



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DO SALVADOR  
ESCOLA DE ENGENHARIAS E ARQUITETURA  
BACHARELADO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**NADINE SOUZA DA SILVA  
RUBIA RAIANA NASCIMENTO DOS REIS**

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA PARA UM PROCESSO DE  
ENCAPSULAMENTO DE AROMAS**

**SALVADOR – BAHIA**

**2025**

**NADINE SOUZA DA SILVA**  
**RUBIA RAIANA NASCIMENTO DOS REIS**

**AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA PARA UM PROCESSO DE  
ENCAPSULAMENTO DE AROMAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Católica do Salvador, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. MSc. Wagner Almeida Mônico  
Conceição

**SALVADOR – BAHIA**  
**2025**

## **AGRADECIMENTOS**

Dedicamos nossos sinceros agradecimentos à Universidade Católica do Salvador (UCSAL), pela formação sólida e pelo ambiente acadêmico que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Expressamos nossa profunda gratidão ao nosso orientador, Prof. MSc. Wagner Almeida Mônico Conceição, por sua dedicação, paciência, valiosos ensinamentos e pelo rigor metodológico que nos guiou em cada etapa deste projeto.

Agradecemos também a todos os professores da escola de engenharias e arquitetura, que, ao longo do curso de Engenharia Química, contribuíram para a construção do nosso conhecimento técnico.

Por fim, mas com a mais profunda emoção, agradecemos às nossas famílias, amigos e parceiros, por todo o suporte emocional, incentivo incondicional e compreensão durante a jornada da graduação e a fase de elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sem o apoio de vocês, esta conquista não seria possível.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta o Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE) para a implantação de uma unidade industrial de produção de aromas encapsulados, utilizando a tecnologia de secagem por aspersão (*Spray Drying*). A metodologia adotada envolveu revisão bibliográfica, definição da capacidade produtiva da planta em 7.200 toneladas por ano e a realização dos balanços de massa e energia, resultando no dimensionamento dos equipamentos principais. O investimento total do projeto foi estimado em R\$ 77.347.204,30. A análise de viabilidade foi comparada com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 15% ao ano, que demonstrou que o projeto é rentável. Os principais indicadores econômicos obtidos foram: Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 354.225.234,70 e Taxa Interna de Retorno (TIR) de 35% ao ano. A segurança do investimento é reforçada por um tempo de retorno (*Payback*) de apenas 34 meses. Os resultados confirmam a solidez técnica e a elevada viabilidade econômica da unidade industrial proposta.

**Palavras-chave:** EVTE. *Spray Drying*. Encapsulamento. VPL. TIR.

## ABSTRACT

This study presents the Technical-Economic Feasibility Study (TEFS) for the implementation of an industrial unit dedicated to the production of encapsulated flavors using spray drying technology. The adopted methodology included a literature review, the definition of the plant's production capacity at 7,200 tons per year, and the execution of mass and energy balances, which supported the sizing of the main equipment. The total project investment was estimated at R\$ 77,347,204.30. The feasibility analysis, based on a minimum attractive rate of return (MARR) of 15% per year, demonstrated that the project is profitable. The key economic indicators obtained were: a net present value (NPV) of R\$ 354,225,234.70 and an internal rate of return (IRR) of 35% per year. The investment's robustness is further reinforced by a payback period of only 34 months. Overall, the results confirm the technical soundness and strong economic viability of the proposed industrial unit.

**Keywords:** TEFS. Spray Drying. Encapsulation. NPV. IRR.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação entre aromatizantes naturais e sintéticos

Tabela 2 – Premissas de projeto adotadas para o balanço de massa e respectivas referências bibliográficas

Tabela 3 – Premissas de cálculo para o balanço de energia

Tabela 4 – Especificações para cotação do atomizador

Tabela 5 – Premissas e demanda do trocador de calor (TC-01)

Tabela 6 – Premissas de vazão e propriedades para o dimensionamento do ciclone (CI-01)

Tabela 7 – Especificações de capacidade e materiais dos tanques de processo (TQ)

Tabela 8 – Especificações e potência da bomba B-01 (solução de parede)

Tabela 9 – Especificações da bomba B-02 (óleo essencial de laranja)

Tabela 10 – Especificações da bomba B-03 (emulsão de alimentação)

Tabela 11 – Especificação do tratamento de ar comprimido (FILT-01)

Tabela 12 – Especificação do compressor de ar (C-01)

## LISTA DE ABREVIATURAS

BE - Balanço de Energia

BM - Balanço de Massa

CAPEX - *Capital Expenditure* (Custo de Investimento de Capital)

CL - Ciclone

EVTE - Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica

FEL - *Front-End Loading*

OPEX - *Operational Expenditure* (Custo Operacional)

PEC - *Purchased Equipment Cost* (Custo de Aquisição de Equipamento)

PFD - *Process Flow Diagram* (Fluxograma de Processo)

SD - *Spray Dryer*

TC - Trocador de Calor

TIR - Taxa Interna de Retorno

TMA - Taxa Mínima de Atratividade

TQ - Tanque

VPL - Valor Presente Líquido

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de cápsulas: (A):Matriz; (B):Mononuclear ou Simples; (C): Simples Irregular; (D): Duas paredes; (E): Polinuclear; (F) Agrupamento de microcápsulas

Figura 2 – Ilustração do fluxo EVTE

Figura 3 – Ciclo de vida de um projeto

Figura 4 – Equação para cálculo do VPL

Figura 5 – Unidade de processo para encapsulamento de aroma utilizando *Spray Drying*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	12
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos</b>	12
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	12
<b>3.1</b>	<b>Indústria de alimentos</b>	12
3.1.1	Aromas	13
3.1.2	Óleo de laranja: aplicabilidade e importância na indústria	15
<b>3.2</b>	<b>Encapsulamento</b>	16
3.2.1	Técnica de <i>spray drying</i>	17
3.2.1.1	Limitações do processo de <i>spray drying</i>	18
3.2.2	Encapsulante	19
3.2.2.1	Tipos de encapsulantes	19
<b>3.3</b>	<b>Estudo de viabilidade técnica e econômica</b>	20
<b>3.4</b>	<b>Metodologia Front-End Loading (FEL)</b>	21
3.4.1	Custos	22
3.4.1.1	Custos operacionais	22
3.4.1.2	Custos de investimentos	22
3.4.2	Valor Presente Líquido (VPL)	23
3.4.3	Taxa de Retorno Interno (TIR)	23
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	23
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	24
<b>5.1</b>	<b>Definição da escala de produção</b>	24
5.1.1	Estudo de mercado e comércio exterior	24
5.1.2	Referências industriais e escala proposta	24
5.1.3	Justificativa técnica-econômica da escala	25
<b>5.2</b>	<b>Seleção de matérias-primas e utilidades</b>	25
5.2.1	Agente encapsulante	25
5.2.2	Aroma e solvente	26
5.2.3	Composição da solução de alimentação	26
5.2.4	Infraestrutura de utilidades e local de instalação	26

<b>5.3</b>	<b>Descrição do processo</b>	27
<b>5.4</b>	<b>Balanco de massa e composição de correntes</b>	28
5.4.1	Premissas de projeto	28
5.4.2	Balanco de massa	29
<b>5.5</b>	<b>Balanco de energia e demanda de utilidades</b>	29
5.5.1	Premissas do balanço de energia	30
5.5.2	Balanco de energia	30
5.5.3	Demanda de utilidades	30
<b>5.6</b>	<b>Dimensionamento dos equipamentos</b>	31
5.6.1	Dimensionamento do secador por atomização (SD-01)	32
5.6.2	Dimensionamento do trocador de calor (TC-01)	33
5.6.2.1	Premissas de carga térmica e utilidade	33
5.6.2.2	Cálculo da área de troca térmica (A)	34
5.6.3	Dimensionamento do ciclone (CI-01)	35
5.6.3.1	Premissas de vazão e propriedades	35
5.6.3.2	Cálculo do diâmetro do ciclone ( $D_c$ )	36
5.6.4	Especificação dos tanques de processo e estocagem (TQ)	36
5.6.4.1	Detalhamento dos tanques de processo	37
5.6.4.2	Potência estimada de agitação (TQ-01 e TQ-02)	37
5.6.5	Especificação das bombas de transferência (B)	38
5.6.6	Especificação final de equipamentos auxiliares	40
5.6.6.1	Sistema de ar comprimido e filtragem	40
<b>5.7</b>	<b>Estimativa de custos e análise econômico-financeira</b>	41
5.7.1	Investimento inicial	41
5.7.2	Custos e receita operacionais	42
5.7.3	Análise econômico-financeira	43
<b>5.8</b>	<b>Análise da vida útil da planta industrial</b>	43
<b>5.9</b>	<b>Condições operacionais de risco e segurança de processos</b>	44
5.9.1	Riscos térmicos e de sobretemperatura	44
5.9.2	Riscos de vapor e ar quente	44
5.9.3	Riscos de explosão de poeira	44
5.9.4	Riscos mecânicos e pressurização	44

5.9.5	Riscos químicos.....	45
5.9.6	Riscos elétricos e de parada súbita .....	45
5.9.7	Riscos ocupacionais.....	45
5.9.8	Riscos ambientais .....	45
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de alimentos, bebidas e cosméticos enfrenta desafios significativos na preservação de compostos voláteis, especialmente aromatizantes, devido à sua elevada sensibilidade ao calor, oxigênio e umidade. Esses fatores promovem degradação química e perdas sensoriais durante o processamento e armazenamento, o que afeta diretamente a qualidade final e a aceitação do produto pelo consumidor (Paccola, 2017).

Essas limitações tornam evidente a necessidade de tecnologias capazes de proteger tais compostos e preservar suas propriedades funcionais ao longo do tempo. Entre as alternativas disponíveis, destacam-se as abordagens que promovem maior estabilidade e controle da liberação, garantindo melhor desempenho sensorial e ampliando a vida útil dos produtos (Paccola, 2017).

De acordo com Barroso *et al.* (2021), a técnica de encapsulamento tem se mostrado uma abordagem eficiente, proporcionando a proteção de compostos sensíveis e permitindo a liberação controlada desses componentes ao longo do tempo, o que contribui para a prolongação de sua ação e eficácia.

No setor alimentício, o encapsulamento é particularmente importante, pois contribui para a preservação de aromas e sabores, que, de outra forma, podem se dissipar rapidamente, comprometendo a qualidade e a experiência do consumidor (Yamasaki, 2020).

Os métodos de encapsulamento apresentam vantagens e desvantagens. Por exemplo, a gelificação iônica (Ferreira *et al.*, 2019) e o uso de biopolímeros (Silva, 2021), como alginatos e carragenas, oferecem alternativas sustentáveis, mas podem ter limitações em termos de resistência térmica e escalabilidade industrial. Já os métodos baseados em polímeros sintéticos (Martins, 2015), como o uso de poliestireno, são eficazes em garantir maior resistência e durabilidade às cápsulas, mas suas preocupações ambientais podem limitar seu uso.

Além desses métodos de encapsulamento, pode-se citar também o *spray drying* que, segundo Barroso (2021), se destaca como uma das abordagens mais eficazes, especialmente para compostos voláteis, como aromas alimentares.

O *spray drying* segundo Yamasaki (2020), é um método que envolve a atomização de soluções ou suspensões seguidas pela rápida evaporação do solvente em um fluxo de ar quente, resultando na formação de partículas sólidas encapsuladas. A técnica é reconhecida pela sua alta eficiência operacional, baixo custo e escalabilidade industrial, características que a tornam amplamente utilizada na indústria alimentícia. Barroso (2021) complementa que a técnica tem se mostrado eficaz em manter a qualidade sensorial de alimentos processados, resultando em

aromas mais duradouros e estáveis. A flexibilidade do método permite ajustes na distribuição de partículas, o que o torna ideal para atender às necessidades específicas de diversos setores alimentícios.

Apesar do comprovado potencial técnico, a decisão de implantar uma nova unidade industrial, especialmente a de *spray drying*, exige um estudo detalhado de engenharia de projetos. Diante dessa necessidade de rigor no investimento, este trabalho se propõe a realizar o estudo de viabilidade técnico-econômica (EVTE) do projeto. Para tal, serão realizados o dimensionamento do processo, a estimativa de custos (CAPEX e OPEX) e a análise dos indicadores de rentabilidade, como valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR).

## **2 OBJETIVO**

Elaborar a viabilidade técnica e econômica para implantação de uma unidade industrial para a produção de aromas encapsulados. O estudo se concentrou na aplicação da tecnologia de secagem por aspersão (*spray drying*), uma técnica que visa otimizar a fixação, estabilidade e durabilidade dos compostos voláteis, contribuindo para a inovação e sustentabilidade do processo.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma revisão bibliográfica do estado da arte processo de *spray drying* para o encapsulamento de aromas;
- Definir a capacidade produtiva da planta;
- Realizar uma estimativa dos investimentos iniciais, custos operacionais, e retorno financeiro esperado com a implantação da unidade para produção de aromas encapsulados.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Indústria de alimentos**

Segundo a ABIA (2025), a indústria alimentícia desempenha um papel crucial na economia brasileira, representando 10,8% do PIB e gerando 2,1 milhões de empregos diretos. O setor alcançou um faturamento de R\$ 1,277 trilhão em 2024, com crescimento de 9,98% em relação ao ano anterior.

Além de sua ligação com o agronegócio onde processa 62% da produção agropecuária nacional e lidera as exportações de alimentos industrializados, a relevância do setor se manifesta

principalmente pelos investimentos em inovação. O setor destinou R\$ 35,9 bilhões para pesquisa e desenvolvimento em 2023, o que reflete sua importância no mercado interno e externo, confirmando a necessidade de buscar novas tecnologias (Canal Rural, 2025).

Dentro desse cenário de constante inovação e busca por diferenciação, a Associação Brasileira de Empresas de Ingredientes, Aromas e Sais (AFEBRAS, 2023) destaca a importância fundamental dos aromas. O aroma não só realça o sabor dos alimentos, mas é um dos principais determinantes nas decisões de compra dos consumidores.

Estudos como o de Jomori *et al.* (2020) indicam que o aroma influencia a escolha alimentar e evoca emoções e memórias, criando uma conexão emocional com o produto. Dessa forma, o aroma se torna um fator chave no desenvolvimento de produtos alimentícios, influenciando diretamente a experiência do consumidor.

### 3.1.1 Aromas

De acordo com a Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 725, de 1º de julho de 2022, as misturas de substâncias com propriedades odoríferas e/ou sápidas, capazes de conferir ou intensificar o aroma e/ou sabor dos alimentos, são classificadas como aromatizantes. Essa RDC se aplica tanto aos produzidos e comercializados nos países do MERCOSUL quanto àqueles importados de outros países/regiões. De acordo com o regulamento, os aromatizantes são classificados em duas categorias principais: naturais e sintéticos.

Os aromatizantes naturais são aqueles obtidos exclusivamente por métodos físicos, microbiológicos ou enzimáticos a partir de matérias-primas de origem vegetal ou animal, como óleos essenciais e extratos, que podem passar por tratamentos como fermentação, torrefação ou cocção para extrair suas propriedades aromáticas. Já os aromatizantes sintéticos são produzidos por processos químicos, replicando ou criando moléculas aromáticas. A resolução também detalha os métodos de obtenção dos óleos essenciais, que incluem destilação a vapor, e outros tratamentos para concentrar ou modificar os componentes voláteis dos extratos (ANVISA, 2022).

Os aromatizantes naturais são substâncias extraídas de fontes vegetais ou animais que possuem uma complexidade química notável. Esses compostos são formados por uma mistura de várias moléculas voláteis que, em conjunto, conferem um aroma característico a cada produto. De acordo com De Maria *et al.* (1998), o aroma do café torrado, por exemplo, é originado por mais de mil compostos identificados, que interagem entre si e, ainda assim, alguns

especialistas na área indicam que ainda há a possibilidade de identificar dezenas de outros componentes no futuro.

A diversidade química presente nos óleos essenciais naturais é responsável pela ampla gama de aromas, e essa complexidade pode variar significativamente entre diferentes espécies vegetais (Augusto *et al.*, 2024). Essa riqueza de compostos torna os aromas naturais mais complexos e menos previsíveis em comparação aos sintéticos, que geralmente consistem em moléculas isoladas ou combinações específicas projetadas para imitar fragrâncias naturais. A identificação e análise desses compostos exigem técnicas avançadas, como a cromatografia gasosa, por exemplo.

Em contraste com os naturais, os aromatizantes sintéticos são produtos fabricados por meio de processos químicos industriais para replicar ou criar moléculas aromáticas. Conforme a RDC nº 725 (ANVISA, 2022), esses compostos não derivam diretamente de fontes naturais. Eles são frequentemente preferidos pela maior estabilidade, pelo controle preciso do perfil sensorial desejado e pelo menor custo de produção, em comparação aos aromatizantes naturais.

Segundo o portal Alimentos Sem Mitos [s.d.], esses aromatizantes são obtidos por processos químicos que replicam ou criam moléculas aromáticas, o que permite à indústria alcançar os sabores e aromas desejados a preços mais baixos e de maneira mais eficiente.

Para ilustrar de maneira mais clara as distinções entre essas duas categorias, a Tabela a seguir resume os aspectos principais dos aromatizantes naturais e sintéticos, conforme a RDC nº 725 (2022):

Tabela 1 – Comparação entre aromatizantes naturais e sintéticos

Aspecto	Aromas naturais	Aromas sintéticos
Definição	Substâncias ou misturas obtidas exclusivamente por métodos físicos, microbiológicos ou enzimáticos a partir de matérias-primas vegetais ou animais.	Substâncias ou misturas criadas através de processos químicos industriais para replicar ou criar novas moléculas aromáticas.
Origem	Derivados de fontes naturais, como plantas.	Criados por processos químicos.
Métodos de obtenção	Métodos físicos, microbiológicos ou enzimáticos, como destilação a vapor, fermentação, torrefação ou cocção.	Processos químicos industriais que replicam ou criam moléculas aromáticas.
Estabilidade e controle	Menor estabilidade e maior variação no perfil sensorial.	Maior estabilidade e controle preciso sobre o perfil sensorial.

Sustentabilidade	O impacto ambiental pode variar conforme o tipo de planta, o processo de extração utilizado e as práticas agrícolas adotadas.	Menor impacto ambiental.
Exemplos	Óleos essenciais, extratos de frutas, especiarias, flores e ervas.	Aromas artificiais, como baunilha sintética, sabor de frutas, entre outros.

Fonte: Elaborado pelas discentes com base na RDC nº 725 (ANVISA, 2022).

A volatilidade dos compostos aromáticos, tanto naturais quanto sintéticos, é uma característica essencial que influencia diretamente a percepção sensorial dos alimentos. Essa volatilidade está relacionada à capacidade dos compostos de se evaporarem, o que pode resultar em perdas significativas do aroma e sabor durante o processamento, armazenamento e até mesmo o consumo do produto. Compostos com baixa massa molecular e alta pressão de vapor tendem a se dissipar mais rapidamente, prejudicando a experiência sensorial desejada (Reineccius, 2006).

Para mitigar essa perda, o encapsulamento surge como uma solução eficaz, onde uma barreira é formada ao redor dos compostos voláteis, restringindo sua exposição a fatores externos, como oxigênio, temperatura e umidade.

Nesse contexto, a escolha do composto a ser encapsulado é fundamental. Entre os diversos compostos voláteis utilizados pela indústria de alimentos, o óleo essencial de laranja foi selecionado como foco deste trabalho. Esse óleo destaca-se como um aroma natural popular, valorizado por sua nota cítrica (SILVESTRE, 2018).

### 3.1.2 Óleo de laranja: aplicabilidade e importância na indústria

O óleo essencial de laranja é amplamente utilizado na indústria alimentícia devido ao seu perfil sensorial fresco, cítrico e adocicado, associado à sensação de limpeza, naturalidade e bem-estar. Esse óleo é extraído principalmente da casca da *Citrus sinensis*, por meio de processos como a prensagem a frio ou destilação a vapor, sendo o limoneno seu componente majoritário, representando cerca de 90 a 95% da composição (FERRONATTO; ROSSI, 2018).

Na indústria de alimentos e bebidas, o óleo de laranja é utilizado como agente flavorizante em produtos como balas, bebidas, sobremesas lácteas e panificados. Além disso, é empregado como conservante natural devido às suas propriedades antimicrobianas e antioxidantes.

A crescente demanda por ingredientes naturais e a preocupação com os efeitos adversos de conservantes sintéticos têm impulsionado o uso de óleos essenciais cítricos, como o de laranja, sendo alternativas mais seguras e saudáveis (FACT.MR, 2023).

Em termos de mercado, o segmento de alimentos e bebidas representa mais de 50% da demanda global por óleos essenciais cítricos, com o óleo de laranja sendo responsável por aproximadamente 40% desse mercado. Especificamente, o mercado global de óleo essencial de laranja foi avaliado em cerca de US\$ 4 bilhões em 2022, com projeções indicando um crescimento para US\$ 6 bilhões até 2032, a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,1% (FACT.MR, 2023). Esse crescimento é impulsionado pela preferência dos consumidores por produtos com ingredientes naturais e pela busca por alternativas aos aditivos sintéticos.

Apesar de suas vantagens, o óleo essencial de laranja apresenta alta sensibilidade à luz, ao oxigênio e às temperaturas elevadas, o que pode comprometer sua estabilidade química e reduzir significativamente seu potencial aromático durante o processamento e o armazenamento. Para contornar essas limitações, técnicas de encapsulamento têm sido amplamente empregadas, permitindo proteger os compostos voláteis e preservar suas características sensoriais ao longo da vida útil do produto.

### **3.2 Encapsulamento**

O encapsulamento é uma técnica utilizada para envolver substâncias ativas, como aromas, vitaminas ou óleos essenciais, em um material protetor, formando pequenas partículas conhecidas como micro ou nano cápsulas (Yamasaki, 2020). Essa técnica tem como principal objetivo preservar as propriedades dos compostos, protegendo-os contra fatores externos como oxigênio, luz, umidade e calor, que podem degradar ou volatilizar essas substâncias.

Barroso *et al.* (2023) afirma que o encapsulamento é amplamente empregado em diversas indústrias, como a alimentícia, farmacêutica e cosmética, pois além de garantir a estabilidade dos compostos, permite controlar a liberação dos ingredientes ativos, mascarar sabores indesejáveis e facilitar a manipulação e incorporação dos ingredientes em diferentes matrizes.

O conceito fundamental do encapsulamento baseia-se na formação de uma barreira física entre o núcleo (material ativo) e o ambiente externo, utilizando materiais chamados encapsulantes ou materiais de parede. Exemplos comuns de encapsulantes incluem maltodextrina, goma arábica, amidos modificados e proteínas, que oferecem diferentes propriedades de proteção e solubilidade, conforme as necessidades específicas do produto (Yamasaki, 2020).

Dentre os métodos disponíveis para realizar o encapsulamento, destaca-se o *spray drying*, devido à sua alta produtividade, baixo custo e facilidade de operação. Esses fatores tornam o *spray drying* uma técnica preferida para encapsular compostos sensíveis, preservando suas propriedades enquanto possibilita a produção em larga escala (Barroso *et al.*, 2023).

### 3.2.1 Técnica de *spray drying*

O *spray drying*, ou secagem por atomização, é um método de secagem amplamente empregado na indústria de alimentos desde a década de 1950, sendo também uma técnica usual para o encapsulamento de diversos compostos bioativos (Barroso *et al.*, 2021). A técnica se destaca pela sua adaptabilidade para produção em escala industrial, com custos operacionais relativamente baixos e processos simples e flexíveis (Geranpour *et al.*, 2020).

No processo de encapsulamento via *spray drying*, o agente ativo, frequentemente de natureza hidrofóbica, é emulsificado em uma solução aquosa contendo o material de parede (Yamasaki, 2020). Podem ser aplicadas etapas de homogeneização em alta pressão ou microfluidização para garantir a dispersão adequada (Saifullah *et al.*, 2019).

A escolha do material de parede é crucial, sendo preferíveis materiais solúveis em água, capazes de formar gel, mas com baixa viscosidade em alta concentração para evitar o entupimento do atomizador (Shishir *et al.*, 2017).

A solução ou suspensão é então injetada em um equipamento *spray dryer* através de um bico atomizador, formando minúsculas gotículas (Ozkan *et al.*, 2019). Estas gotículas entram em contato com um fluxo de ar quente, geralmente em contracorrente com a alimentação, promovendo a rápida evaporação do solvente e a consequente secagem das partículas (Shishir & Chen, 2017). O material encapsulado em pó é, então, recuperado em um ciclone ou filtro (Ozkan *et al.*, 2019). Durante a secagem, as partículas tendem a adquirir uma forma esférica, com a fase oleosa (material a ser encapsulado) envolvida pela fase aquosa contendo o material de parede (Azeredo, 2005).

Apesar de envolver temperaturas elevadas na câmara de secagem (entre 220 e 250 °C), a alta velocidade do processo de secagem impede que o núcleo do material encapsulado alcance essa temperatura por um tempo prolongado (Islam *et al.*, 2018). Contudo, materiais altamente sensíveis ao calor ainda podem apresentar perdas significativas (Sultana *et al.*, 2017).

O *spray drying* apresenta diversas vantagens, como a produção contínua de partículas com um processo operacional relativamente simples (Yamasaki, 2020). O tempo de secagem é

rápido, variando de 3 a 30 segundos, o que contribui para a viabilidade e minimização de custos do processo.

Estudos indicam que a concentração do óleo a ser encapsulado influencia a eficiência do encapsulamento (Adamiec, 2006). Da mesma forma, o tipo de biopolímero utilizado como material de parede também afeta as características das partículas obtidas (Baranauskienė, 2006). Aromas em pó obtidos pela tecnologia de *spray drying* são amplamente utilizados em diversos produtos alimentícios, como confeitos (Madene, 2006) e alimentos da categoria *baby food* (Afoadwah, 2012).

### 3.2.1.1 Limitações do processo de *spray drying*

Apesar de ser uma técnica amplamente utilizada e considerada contínua e controlada, o processo de *spray drying* apresenta certas limitações que precisam ser consideradas para garantir a eficiência e a qualidade do produto encapsulado (Yamasaki, 2020).

Uma dificuldade significativa reside na aplicação do *spray drying* para alimentos com alto teor de açúcares. A pegajosidade e a elevada higroscopicidade desses materiais podem reduzir consideravelmente o rendimento do processo, dificultando o manuseio do pó (Yamasaki, 2020). Para mitigar esses problemas, ajustes como a operação em temperaturas mais baixas e a adição de certos aditivos são frequentemente necessários (Ferrari *et al.*, 2012).

A temperatura do ar de secagem é um parâmetro delicado. Aumentá-la pode acelerar a secagem, mas também pode levar à perda de compostos voláteis (Yamasaki, 2020). Por outro lado, temperaturas mais baixas podem preservar esses compostos, mas podem comprometer a eficiência da secagem (Liu *et al.*, 2004). A otimização da temperatura é, portanto, essencial (Barroso *et al.*, 2021; Sultana *et al.*, 2017).

A escolha e a disponibilidade dos materiais de parede também representam uma limitação. A seleção do encapsulante é crucial para a proteção dos compostos e a qualidade do produto final (Yamasaki, 2020).

A viscosidade do líquido de alimentação é outro fator limitante. Uma viscosidade elevada dificulta a formação de gotículas finas no atomizador, o que prejudica a taxa de secagem (Yamasaki, 2020). Já uma baixa viscosidade facilita a atomização e melhora a eficiência do processo.

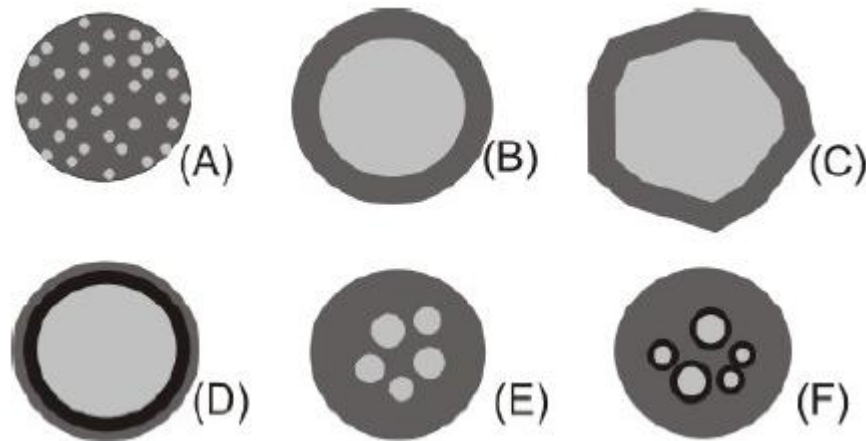
### 3.2.2 Encapsulante

Segundo Yamasaki (2020) a natureza do material encapsulante influencia na eficiência e estabilidade do composto encapsulado, e diversas variáveis como propriedades do aroma, temperatura do sistema, viscosidade, tamanho da partícula obtida interferem no processo como um todo.

A depender das propriedades físico-químicas do material do núcleo, da composição da parede e da técnica de encapsulação empregada, podem ser obtidos diferentes tipos de partículas. O critério de seleção do material de parede é baseado principalmente nas propriedades físico-químicas como: solubilidade, peso molecular, transição vítrea, formação de filme e propriedades emulsificantes, do método de encapsulação escolhido e aplicação final do produto (GHARSALLAOUI, 2007)

Desta forma, diferentes microcápsulas e microesferas são produzidos diante uma grande variedade de encapsulante disponíveis (monômeros ou polímeros) e frente a diferentes métodos de encapsulação existentes como por exemplo: *spray-drying*, *spray-chilling* ou *spray-cooling* (GHARSALLAOUI, 2007).

Figura 1 – Modelos de cápsulas: (A): Matriz; (B): Mononuclear ou Simples; (C): Simples Irregular; (D): Duas paredes; (E): Polinuclear; (F) Agrupamento de microcápsulas.



Fonte: Azeredo, 2005.

#### 3.2.2.1 Tipos de encapsulantes

Há diversos tipos de encapsulantes, que é um material para envolver, proteger e isolar uma substância ativa, formando uma cápsula ao seu redor, conforme Azeredo (2005), temos:

- Polímeros naturais (gelatina, alginato, pectina, amido e celulose);
- Polímeros sintéticos (poliuretano e poliestireno);

- Lipídios (ceras e triglicerídeos);
- Proteínas (caseína e albumina);
- Carboidratos (ciclodextrinas e goma arábica).

Com base em seu estudo, Azeredo (2005) afirma que os carboidratos são os materiais mais utilizados para encapsulação, graças à sua capacidade de se ligar a compostos de sabor, além de sua diversidade e baixo custo. A goma arábica é constituída por um arranjo altamente ramificado de galactose, arabinose, ramnose e ácido glicurônico, contendo ainda cerca de 2% de um componente proteico ligado covalentemente a esse arranjo molecular, exercendo um papel crucial na determinação das propriedades emulsificantes da goma.

É considerada historicamente como o material encapsulante por excelência, graças à sua solubilidade, baixa viscosidade, boas propriedades emulsificantes, sabor suave e alta estabilidade oxidativa conferida a óleo. Por outro lado, tem alto custo e problemas de disponibilidade, já que é produzida em regiões sujeitas a variações climáticas imprevisíveis e conflitos políticos, o que pode comprometer sua oferta.

Complementando, Azeredo (2005) diz que o amido é um material abundante e barato. Em seu estado nativo, o amido, na forma de grânulos, é insolúvel em água fria. Entretanto, quando uma dispersão aquosa de amido sofre aquecimento suficiente para romper os grânulos forma-se uma pasta capaz de produzir filmes de boas propriedades mecânicas. Por outro lado, a viscosidade das soluções de amido é geralmente alta demais para a maior parte dos processos de encapsulação. Além disso, o amido não possui grupos hidrofóbicos, não exercendo, portanto, praticamente nenhum efeito estabilizante de emulsões, a não ser pelo aumento da viscosidade.

### **3.3 Estudo de viabilidade técnica e econômica**

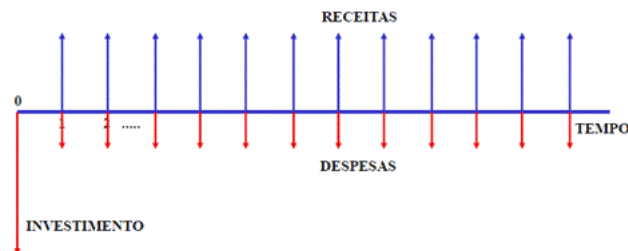
Segundo MUSTAFA (2015), ao instalar uma nova fábrica, modernizar ou ampliar uma fábrica existente, comprar novos equipamentos ou simplesmente alugar uma máquina, isto é, ao fazer um novo investimento, uma empresa deve, antes da implantação, fazer um Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE).

A análise de viabilidade econômica e financeira é uma etapa fundamental da engenharia econômica, permitindo avaliar os benefícios de um investimento em relação aos seus custos e às alternativas disponíveis. Esse processo possibilita tanto a comparação entre diferentes opções de aplicação de recursos quanto a avaliação isolada de um investimento, determinando sua atratividade e viabilidade para implementação.

Para essa análise, são utilizados indicadores financeiros essenciais, como a Taxa Interna de Retorno líquida (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL) e a relação VPL/Investimento. Esses índices auxiliam na mensuração da rentabilidade do projeto e na tomada de decisão.

A realização do EVTE exige o levantamento detalhado dos custos envolvidos, incluindo o investimento inicial e os custos operacionais, bem como a projeção das receitas, que podem ser decorrentes do aumento da produção ou de melhorias na eficiência operacional. Esses dados permitem uma análise mais precisa da viabilidade do investimento e do seu retorno financeiro ao longo do tempo.

Figura 2 – Ilustração do fluxo EVTE



Fonte: Metodologia FEL e EVTE, Sérgio Bello Neves.

### 3.4 Metodologia Front-End Loading (FEL)

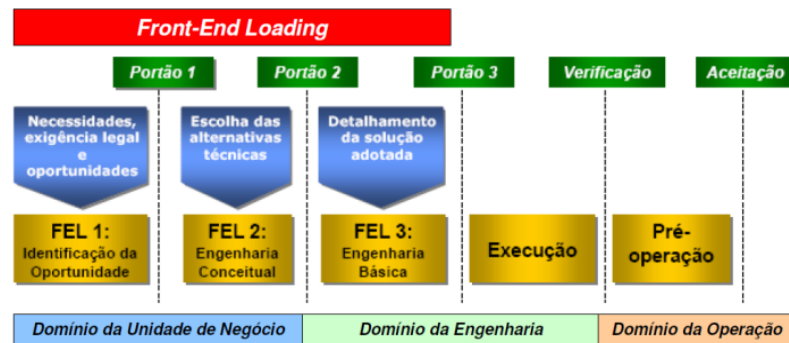
Segundo Enegep (2013) a metodologia FEL é um processo estruturado de planejamento e tomada de decisão em projetos. Seu principal objetivo é garantir que as definições estratégicas e técnicas sejam realizadas de forma antecipada, reduzindo riscos e aumentando a previsibilidade de escopo, prazo e custo.

O FEL é dividido em três fases principais:

- FEL 1 (Conceituação e Planejamento): Avaliação preliminar da viabilidade do projeto, identificação das principais oportunidades e exposição do escopo.
- FEL 2 (Desenvolvimento): Refinamento da solução técnica, incluindo análise de alternativas e estudos de viabilidade detalhados e ajustes no escopo para adequação e atendimento operacional garantindo mais robustez e detalhes.
- FEL 3 (Execução detalhada): Consolidação do planejamento com estimativas precisas de custo, cronograma e definição do escopo definido.

A adoção do FEL segundo Enegep (2013) reduz riscos e aumenta a previsibilidade dos investimentos, garantindo que a tomada de decisões seja feita com base em informações confiáveis.

Figura 3 – Ciclo de vida de um projeto



Fonte: Adaptado de IPA – Enegep, 2013.

### 3.4.1 Custos

#### 3.4.1.1 Custos operacionais

A análise de custos operacionais de uma unidade de processos de encapsulação de aromas utilizando *spray drying* é complexa. Os principais componentes desse custo incluem matérias-primas e insumos, mão de obra, utilidades (energia e insumos industriais), manutenção e reposição, aspectos ambientais (efluentes, resíduos e regulamentação), segurança, logística e armazenamento.

#### 3.4.1.2 Custos de investimentos

Ao estimar o custo de investimento para um processo de encapsulamento de aromas por *spray drying*, os gastos podem ser classificados em diversas categorias, abrangendo desde a infraestrutura até os equipamentos e o capital de giro. Em uma nova instalação, os principais custos iniciais incluem a regulamentação e licenciamento (como certificações e alvarás), o planejamento e engenharia (envolvendo estudos de viabilidade e detalhamento técnico), e a infraestrutura e construção civil (abrangendo obras, instalações elétricas e hidráulicas).

As demais categorias de investimento concentram-se na tecnologia e operação do processo: equipamentos e auxiliares (como *spray dryer*, bombas e filtros), automação e controle (incluindo sensores, sistemas SDCD/PLC e painéis de comando), além de tubulações, válvulas, sistemas de controle e montagem, que são fundamentais para a operação eficiente e segura da unidade.

### 3.4.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Silva e Fontes (2005) o VPL de um projeto de investimento pode ser definido como a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado. Em outras palavras, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos.

Figura 4 – Equação para cálculo do VPL

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}$$

Fonte: Silva e Fontes, 2005.

Onde:  $R_j$ : valor atual das receitas;  $C_j$ : valor atual dos custos;  $i$ : taxa de juros;  $j$ : período em que as receitas ou os custos ocorrem;  $n$ : número de períodos ou duração do projeto.

### 3.4.3 Taxa de Retorno Interno (TIR)

Segundo MUSTAFA (2015) a TIR é a taxa de juros que iguala, em uma única data, os fluxos de entrada e saída de caixa produzidos por uma operação financeira. Em outras palavras, é a taxa de juros que, se utilizada para descontar um fluxo de caixa, produz um resultado nulo.

Ele ainda afirma que até atingir a TIR, o VPL é positivo, indicando atratividade do investimento. A partir desta taxa o valor presente líquido passa a ser negativo, demonstrando que o projeto é incapaz de produzir uma riqueza econômica positiva para uma taxa de desconto superior à TIR.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este trabalho se baseou, inicialmente, na consulta a fontes como artigos científicos, livros e normas regulatórias para compreender os desafios do encapsulamento, as matérias-primas utilizadas e os parâmetros operacionais do processo. Também foram abordadas metodologias de viabilidade técnica e econômica e de projetos de engenharia.

A partir dessas informações, foi realizada a elaboração do projeto, que incluiu a definição da capacidade produtiva com base em análise de mercado, a seleção das matérias-primas e a escolha da tecnologia de encapsulamento. Em seguida, procedeu-se ao dimensionamento dos equipamentos de processos, por meio de cálculos de balanço de massa e energia.

A análise econômica e financeira estimou investimentos, custos operacionais e projeções de receita, utilizando o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) para avaliar a viabilidade do projeto.

## **5 DESENVOLVIMENTO**

O desenvolvimento deste projeto foi estruturado em uma metodologia de engenharia de estudo, com a definição das especificações e dimensionamentos dos principais equipamentos. As premissas foram definidas fundamentadas em dados de mercado, literatura técnico-científica e referências industriais consolidadas

### **5.1 Definição da escala de produção**

A definição da escala de produção da unidade industrial foi realizada com base em um estudo de mercado e nas referências de porte industrial para a tecnologia de *spray drying*.

#### **5.1.1 Estudo de mercado e comércio exterior**

O produto-alvo do processo é o óleo essencial de laranja, um aromatizante amplamente utilizado na indústria de alimentos e bebidas. Sua escolha é justificada pela sua representatividade no mercado, correspondendo a 40% da demanda global por óleos essenciais cítricos e pelo crescimento contínuo do setor. O mercado global de óleos essenciais foi avaliado em US\$ 4 bilhões em 2022, com projeção de atingir US\$ 6 bilhões até 2032, a uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR de 4,1%).

A análise de dados de Comércio Exterior (COMEX) reforça essa viabilidade, mostrando que o Brasil é um exportador líquido tanto de óleo essencial de laranja quanto de aromatizantes encapsulados. Desse modo, o composto foi escolhido com base em sua relevância e no potencial de inserção do produto no mercado nacional e internacional.

#### **5.1.2 Referências industriais e escala proposta**

A capacidade de produção para encapsulamento segundo BIZZO; REZENDE (2022) é categorizada da seguinte forma: plantas-piloto (1-10 kg/h), planta piloto industrial (50-100 kg/h), escala industrial média (200-1.000 kg/h) e grandes plantas industriais (>1.500 kg/h). Plantas industriais para a produção de ingredientes e aromas operam em escalas que podem

variar de centenas a milhares de quilogramas por hora de produto, com taxas de evaporação de água proporcionais.

Com base na análise teórica, a capacidade de produção do projeto foi definida na faixa de 1.000 kg/h, enquadrando-se como uma planta de médio porte. Considerando operação contínua em dois turnos de 12 horas (24 h/dia), a unidade alcançaria uma produção diária de aproximadamente 24 toneladas o que corresponde a cerca de 7.200 toneladas por ano, tomando como referência 300 dias de operação anual.

### 5.1.3 Justificativa técnica-econômica da escala

A capacidade de produção de 1000 kg/h foi definida como uma proposta realista, compatível com tecnologias de *spray drying* amplamente adotadas. A escala de 7.200 toneladas/ano representa uma fração tecnicamente viável e comercialmente atrativa para o mercado nacional e internacional, mantendo o projeto dentro de um porte intermediário, com realismo técnico e econômico. Essa escala posiciona a planta como de médio porte, apta a atender nichos de mercado. A adoção tecnológica é viável, já que equipamentos industriais de *spray drying* disponíveis no mercado suportam essa faixa de produção, oferecendo flexibilidade para expansão futura.

## 5.2 Seleção de matérias-primas e utilidades

A seleção de matérias-primas e a formulação da solução de alimentação são etapas críticas para o sucesso da microencapsulação.

### 5.2.1 Agente encapsulante

O Capsul® foi escolhido como material de parede principal. Trata-se de um amido modificado (geralmente de milho ceroso ou tapioca) que, por meio de modificação química, adquire excelentes propriedades de emulsificação e de formação de filme. Este material é amplamente utilizado na indústria como substituto de gomas e proteínas de alto custo, devido à sua baixa viscosidade e capacidade de permitir altos teores de sólidos, otimizando o processo de *spray drying* (Ingredion, 2024). Sua capacidade de reter o encapsulado no interior da microcápsula e de atuar como emulsificante para o óleo de laranja, garantindo a estabilidade da emulsão, foi confirmada em estudos que utilizaram o material (Aburto, Tavares e Martucci, 1998).

### 5.2.2 Aroma e solvente

O óleo essencial de laranja foi selecionado por sua relevância de mercado e por ser um composto volátil que se beneficia do encapsulamento para estabilidade. Sua alta volatilidade e susceptibilidade à oxidação são amplamente reconhecidas (FERRONATTO; ROSSI, 2018), e sua importância comercial é destacada por projeções de crescimento global no setor (FACT.MR, 2023). A água foi escolhida como solvente padrão, por ser um recurso abundante, de baixo custo e seguro. Sua utilização permite a dissolução do agente encapsulante e a formação de emulsões estáveis, prática comum na microencapsulação de óleos essenciais (Carmona *et al.*, 2018).

### 5.2.3 Composição da solução de alimentação

A solução de alimentação foi formulada com a composição total de 20% (p/p) de sólidos e 80% (p/p) de água. A escolha por uma concentração moderada (20%) é uma premissa de projeto que visa controlar a viscosidade da emulsão, garantindo o fluxo e a eficiência da atomização através do bico, sem causar problemas operacionais no equipamento. A proporção entre o material de parede (Capsul®) e o material do núcleo (óleo essencial de laranja) é de 4:1 (p/p), uma proporção comprovada como eficaz para otimizar a retenção do aroma em estudos com amido modificado (Sanches, 2023).

### 5.2.4 Infraestrutura de utilidades e local de instalação

A planta foi projetada para ser instalada no polo industrial em Camaçari (BA), um centro estratégico de produção que oferece acesso a infraestruturas e utilidades de forma centralizada. A premissa de adquirir todas as utilidades de forma externa contribui significativamente para a viabilidade econômica e operacional do projeto, uma vez que reduz os custos de investimento inicial (CAPEX) e simplifica as operações.

Vapor: a aquisição de vapor por infraestrutura externa foi adotada em vez de geração própria. A geração de vapor própria demandaria elevados custos de capital, manutenção e equipe especializada, e a compra do vapor permitirá maior foco na atividade principal da planta.

Energia elétrica: adquirida da rede pública para alimentar motores, sistemas de controle e ventiladores.

Ar comprimido: também será adquirido externamente para uso em válvulas pneumáticas ou bicos atomizadores.

Água de processo: a água potável e industrial será adquirida da rede de abastecimento externa.

Efluentes e drenagem: o projeto prevê a terceirização do tratamento de efluentes, eliminando a necessidade de uma estação de tratamento de efluentes própria. O sistema de drenagem será projetado para o descarte adequado de água de lavagem e purga de condensado, que serão tratados externamente.

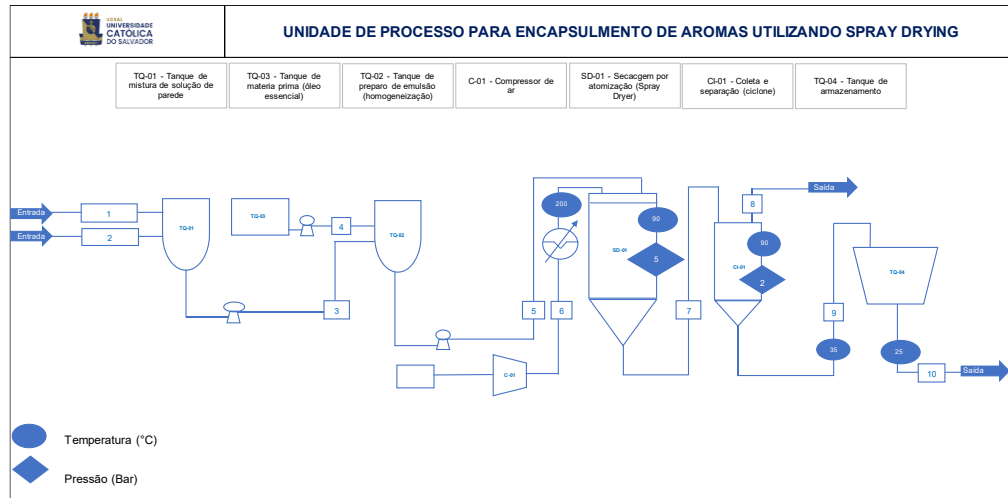
### 5.3 Descrição do processo

A unidade de encapsulamento de aromas utiliza a tecnologia de *spray drying* e é organizada de forma contínua, abrangendo três etapas principais: preparo da emulsão, secagem por atomização e separação/coleta do produto, conforme ilustrado no Anexo 2 (Diagrama de Processo - PFD e Tabela de Balanço de Massa).

O ciclo produtivo se inicia com a etapa de preparação da emulsão. Esta fase é crucial para a estabilidade da mistura e ocorre em dois tanques de processo. Inicialmente, o agente encapsulante (material de parede) é dissolvido em água no tanque de mistura (TQ-01), formando a solução de parede (corrente 3). Posteriormente, essa solução é transferida para o tanque de preparo de emulsão (TQ-02), onde o óleo essencial de laranja (material do núcleo) é introduzido. A agitação mecânica em TQ-02 garante a formação de uma emulsão estável e homogênea, que constitui a emulsão de alimentação (corrente 5).

A fase central do processo é a atomização e secagem, que ocorre no SD-01 (*Spray Dryer*). A emulsão de alimentação (corrente 5) é bombeada para o atomizador, onde é dispersa em finas gotículas. Simultaneamente, o ar aquecido (corrente 6), proveniente do trocador de calor (TC-01), entra em contato imediato com essas gotículas. Este contato promove a rápida transferência de calor e a evaporação do solvente (água), resultando na formação das microcápsulas sólidas em poucos segundos.

Por fim, tem-se a etapa de separação e coleta do produto. O fluxo de gás de exaustão (corrente 7), que carrega o pó seco, é direcionado para o ciclone de separação (CI-01), onde as partículas são separadas da fase gasosa por força centrífuga. O pó encapsulado bruto (corrente 9) é coletado e segue para o armazenamento final, enquanto o gás tratado (corrente 8) é liberado para o meio externo, conforme os requisitos ambientais.

Figura 5 – Unidade de processo para encapsulamento de aroma utilizando *spray drying*

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

## 5.4 Balanço de massa e composição de correntes

O dimensionamento dos equipamentos de processo de secagem por atomização é baseado nos balanços de massa e energia, que definem as vazões de alimentação e de ar necessárias para atingir a capacidade de produção desejada e a umidade final do produto.

### 5.4.1 Premissas de projeto

O projeto para uma unidade com o *spray dryer* é fundamentado em premissas de engenharia e dados de literatura que visam a eficiência do processo, a qualidade do produto e a viabilidade da operação.

Na Tabela 2 estão citadas as premissas para uma unidade com o *spray dryer*:

Tabela 2 – Premissas de projeto adotadas para o balanço de massa e respectivas referências bibliográficas

Premissa	Valor	Justificativa
Capacidade de produção	1000 kg/h de pó final (3% umidade)	Meta de escala industrial definida para o projeto.
Relação núcleo/matriz	1:4 (Óleo: Encapsulante)	A relação de encapsulamento foi definida como 1:4 com base em estudos experimentais disponíveis que demonstram alta eficiência de encapsulamento e menor degradação para o óleo essencial de laranja (Sanches, 2023).
Composição da	20% sólidos (p/p) e 80%	A concentração de sólidos de

alimentação	água (p/p)	20% na emulsão é utilizada para otimizar o processo de atomização e a estabilidade da emulsão (Aburto, Tavares e Martucci, 1998).
Umidade final do produto	3% (p/p)	Assumimos uma umidade residual de 3% para o pó de aroma encapsulado. Este valor é uma prática comum na indústria alimentícia para garantir a estabilidade microbiológica, física e química de pós secos (Carmona et al., 2018).
Perda na parede do <i>spray dryer</i>	2% dos sólidos de alimentação	Referência: Rosenberg et al. (1990).
Perda no ciclone	8% dos sólidos entrantes no ciclone	Referência: Peters et al. (2003).

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.4.2 Balanço de massa

O balanço de massa do processo de encapsulamento segue as etapas sequenciais do fluxo de material: preparação da solução de parede, formação da emulsão, secagem por atomização (SD-01) e, por fim, a separação sólido-gás (CI-01).

O fluxograma do processo, incluindo o número e a composição de todas as correntes, e a tabela de balanço de massa com a vazão mássica de cada componente, estão ambos ilustrados no Anexo 2 (Diagrama de Processo - PFD e Tabela de Balanço de Massa).

Os valores calculados demonstram que, para produzir 1000 kg/h de produto com 3% de umidade, o processo exige uma alimentação de 5388,90 kg/h de emulsão (corrente 5), composta por 20% de sólidos e 80% de água. A taxa de evaporação de água do processo é de 4281,12 kg/h (água na entrada menos umidade na saída), exigindo um fluxo de 105419,81 kg/h de ar de secagem (corrente 6). O balanço de sólidos, considerando todas as perdas da premissa, resultou em uma perda total de 107,78 kg/h de material sólido, garantindo o rendimento de produção determinado.

#### 5.5 Balanço de energia e demanda de utilidades

O balanço de energia determinou a vazão mássica de ar seco necessária para evaporar a quantidade de água definida no balanço de massa, além de ter quantificado a demanda de calor (utilidades) para o processo.

### 5.5.1 Premissas do balanço de energia

As premissas e os valores de projeto utilizados no balanço de energia seguem abaixo:

Tabela 3 – Premissas de cálculo para o balanço de energia

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Observação
Vazão de água a evaporar	F	4281,12	kg/h	Balanço de massa
Temperatura de entrada de ar	T <sub>ent</sub>	200	°C	Valor de projeto
Temperatura de saída de ar	T <sub>sai</sub>	90	°C	Valor de projeto
Temperatura ambiente	T <sub>amb</sub>	25	°C	-
Calor específico do ar seco	C <sub>p,ar</sub>	1,005	kJ/(kg·°C)	-
Calor latente da água	Λ	2450	kJ/kg	-
Fator de perdas de calor	P	0,1 (10%)	-	Referência: Peters <i>et al.</i> (2003)
Diferença de Temperatura (operação)	ΔT <sub>op</sub>	110	°C	T <sub>ent</sub> – T <sub>sai</sub>
Diferença de Temperatura (aquecimento)	ΔT <sub>aq</sub>	175	°C	T <sub>ent</sub> – T <sub>amb</sub>

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

### 5.5.2 Balanço de energia

O balanço de energia para o processo com a utilização do *spray dryer* é baseado no princípio de que o calor fornecido pelo ar quente é utilizado para a evaporação da água e para compensar as perdas de calor para o ambiente.

#### a) Calor necessário para evaporação (Q<sub>nec</sub>)

O calor mínimo necessário para evaporar a água é dado pela multiplicação da vazão de água a evaporar pelo calor latente de vaporização, conforme a Equação E-1 (Anexo 1).

$$Q_{nec} = 10.488.744 \text{ kJ/h}$$

#### b) Vazão mássica de ar seco (F<sub>ar</sub>)

O calor fornecido pelo ar (Q<sub>ar</sub>) é dado pelo seu resfriamento, compensando as perdas do sistema, conforme a Equação E-2 (Anexo 1). Com a substituição dos valores de processo (Tabela 3), a vazão mássica de ar seco calculada é:

$$F_{ar} = 105.419,81 \text{ kg/h}$$

### 5.5.3 Demanda de utilidades

A demanda de utilidades é expressa pelo fluxo total de calor que o ar precisa fornecer para o sistema, considerando as perdas.

O calor total requerido pelo processo ( $Q_{\text{total}}$ ) é determinado a partir do calor necessário para a evaporação  $Q_{\text{nec}}$ , conforme a Equação E-3 (Anexo 1).

$$Q_{\text{total}} = 11.654.160 \text{ kJ/h}$$

O processo de *spray drying* requer uma vazão mássica de ar seco de 105.419,81 kg/h para atender à taxa de evaporação de 4281,12 kg/h. O sistema de aquecimento deve ser capaz de fornecer um calor total de 11.654.160 kJ/h para aquecer o ar e compensar as perdas térmicas.

## 5.6 Dimensionamento dos equipamentos

A etapa de dimensionamento de equipamentos fornece os dados de entrada necessários do processo para o cálculo dos custos. A metodologia adotada priorizou o dimensionamento de equipamentos mais complexos e de maior impacto no investimento total. Os demais equipamentos foram especificados com base em estimativas de projeto e na literatura técnica.

Com isso, os equipamentos foram divididos em duas categorias:

a) Dimensionamento detalhado (maiores drivers de custo)

Esta categoria abrange os equipamentos centrais do processo, cujo custo e complexidade de engenharia justificam o cálculo detalhado de áreas, volumes e potências:

- Secador por atomização (SD-01);
- Trocador de calor (TC-01);
- Ciclone de separação (CI-01).

b) Estimativa por capacidade e fatores de custo (equipamentos auxiliares)

Para os equipamentos auxiliares os cálculos detalhados de engenharia serão substituídos pela utilização direta de fatores de custo baseados na capacidade, facilitando a aplicação do método fatorial na fase de análise econômica.

Tanques de transferência e estocagem:

- TQ-01 - Mistura de solução;
- TQ-02 - Preparo de emulsão;
- TQ-03 - Tanque de estocagem;
- TQ-04 - Armazenamento de produto.

Bombas de transferência:

- B-01;
- B-02;
- B-03.

Sistema de ar comprimido e filtragem:

- Filtros (FILT-01) - Sistema de compressão;
- Compressor de ar (C-01).

#### 5.6.1 Dimensionamento do secador por atomização (SD-01)

O *Spray Dryer* (SD-01) é o principal equipamento do processo e o maior componente do investimento. Seu dimensionamento é baseado na capacidade de evaporação de água e nas condições termodinâmicas estabelecidas no balanço de energia (Seção 5.5).

##### a) Cálculo da taxa de evaporação volumétrica (TEV) e volume da câmara

O volume da câmara ( $V_{\text{câmara}}$ ) é determinado pela vazão de água a evaporar ( $F_{\text{água}}$ ) e pela Taxa de Evaporação Volumétrica (TEV). A TEV é um parâmetro de projeto que define a capacidade de evaporação de água por volume de câmara, ele permite estimar as dimensões do equipamento de forma rápida, baseando-se em critérios de projeto (Sinnott, 2005).

A TEV para *spray dryers* industriais de média a alta capacidade, operando com ar a alta temperatura (200 °C) é adotada a partir de valores de referência de projeto na faixa de 50 a 80 kg de água/h.m<sup>3</sup> (Sinnott, 2005). Por se tratar de uma indústria de médio porte, adotamos TEV = 60 kg de água/h.m. O volume teórico da câmara é calculado conforme a Equação E-4 (Anexo 1):

$$V_{\text{câmara}} = 71,35 \text{ m}^3$$

Um fator de sobredimensionamento de 10% é aplicado sobre o volume teórico. Este fator é uma margem de projeto padrão que visa compensar incertezas de *scale-up* e variações operacionais (Turton *et al.*, 2018).

O volume de projeto final é calculado pela Equação E-6 (Anexo 1):

$$V_{\text{projeto}} = 78,49 \text{ m}^3$$

##### b) Definição das dimensões geométricas (diâmetro e altura)

Com o volume de projeto definido, as dimensões geométricas são estimadas utilizando a relação altura/diâmetro ( $H = 2D$ ) padrão para *spray dryers* industriais.

O cálculo do diâmetro estimado (D) é realizado por meio da Equação E-5 (Anexo 1). O diâmetro de projeto encontrado é:

$$D = 3,68 \text{ m}$$

Com o diâmetro (D) e a relação  $H = 2D$ , a altura cilíndrica é de 7,37 m.

Sendo assim, abaixo temos a Tabela com as especificações necessárias pra cotação:

Tabela 4 – Especificações para cotação do *spray dryer*

Parâmetro	Valor estimado	Unidade
Vazão de água a evaporar	4281,12	kg/h
Volume total da câmara	78,5	m <sup>3</sup>
Diâmetro de projeto (D)	3,7	m
Altura da seção cilíndrica (H)	7,4	m
Relação H/D	2	-

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

### 5.6.2 Dimensionamento do trocador de calor (TC-01)

O trocador de calor (TC-01) é o equipamento projetado para fornecer a carga térmica total ( $Q_{total}$ ) de 11.654.160 kJ/h ao ar de secagem. O dimensionamento visa determinar a área de troca térmica necessária (A) para essa demanda.

#### 5.6.2.1 Premissas de carga térmica e utilidade

O aquecedor de ar foi projetado para aquecer o ar da temperatura ambiente (25 °C) até a temperatura de entrada no secador (200 °C). A Tabela 5 consolida as premissas utilizadas no dimensionamento.

A utilidade escolhida para suprir a demanda é o vapor saturado de alta pressão (30 bar). Esta escolha é uma prática padrão da engenharia para garantir que sua temperatura de saturação (233,8 °C) seja superior à temperatura máxima do ar (200 °C), o que é um requisito fundamental para a força motriz térmica. O vapor é o meio mais eficiente para altas demandas de calor no processo, pois transfere calor por condensação (calor latente) (Turton *et al.*, 2018).

Tabela 5 – Premissas e demanda do trocador de calor (TC-01)

Parâmetro	Valor	Unidade	Observações
Carga térmica total requerida ( $Q_{total}$ )	11.654.160	kJ/h	Valor obtido no balanço de energia.
Potência térmica requerida	3.237,27	Kw	Conversão direta da carga térmica.
Meio de aquecimento	Vapor Saturado	-	Selecionado por alta eficiência térmica e temperatura de saturação superior à temperatura final do ar.

Pressão do vapor	30	bar abs	Pressão industrial padrão para serviços de aquecimento; garante $T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
Temperatura de saturação (Vapor, TV)	233,8	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura de saturação do vapor a 30 bar (Perry & Green, 2008).
Calor latente do vapor a 30 bar ( $\lambda_{\text{vapor}}$ )	1794,6	kJ/kg	Valor tabelado para vapor saturado a 30 bar (Perry & Green, 2008).
Coefficiente global de transferência (U)	270	kJ/(h x m <sup>2</sup> x $^{\circ}\text{C}$ )	Valor típico para trocadores casco-tubo com vapor condensando e ar no lado frio (Perry & Green, 2008; Coulson & Richardson, 2002), já considerando incrustação.

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

### 5.6.2.2 Cálculo da área de troca térmica (A)

O trocador de calor opera em configuração contracorrente. Para o dimensionamento, foi realizada a estimativa da vazão de vapor, da força motriz térmica ( $\Delta T_{ML}$ ) e do coeficiente global de transferência de calor (U), incluindo os fatores de incrustação recomendados para serviços com ar e vapor.

a) Vazão mássica de vapor requerida ( $F_{\text{vapor}}$ )

A vazão mássica de vapor necessária é calculada conforme a Equação E-7 (Anexo 1), dividindo-se a carga térmica total pelo calor latente do vapor.

$$F_{\text{vapor}} = 6494,02 \text{ kg/h}$$

b) Diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{ML}$ ):

Considerando a operação em contracorrente, o cálculo do  $\Delta T_{ML}$  segue da seguinte forma:

- Diferença na extremidade de entrada do ar ( $\Delta T_1$ ): É calculada conforme a Equação E-10 (Anexo 1).

$$\Delta T_1 = 208,8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Diferença na extremidade de saída do ar ( $\Delta T_2$ ): É calculada conforme a Equação E-11 (Anexo 1).

$$\Delta T_2 = 33,8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

A  $\Delta T_{ML}$  é então calculada utilizando esses valores de  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  na Equação E-8 (Anexo 1).

$$\Delta T_{ML} = 96,11 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) Área de troca térmica (A):

A área de troca térmica é determinada pela equação fundamental da transferência de calor, conforme a Equação E-9 (Anexo 1).

$$A = 449,13 \text{ m}^2$$

Devido à grande área de troca térmica requerida e à utilização de vapor como utilidade, o trocador de calor será do tipo casco e tubos.

### 5.6.3 Dimensionamento do ciclone (CI-01)

O Ciclone (CI-01) é o equipamento de separação sólido-gás utilizado para recuperar as partículas finas (pó) que são carregadas pelo gás de exaustão, evitando perdas de produto e reduzindo o impacto ambiental.

O dimensionamento visa estabelecer o diâmetro ( $D_c$ ) do ciclone necessário para processar a alta vazão de gás proveniente do secador, com base em relações geométricas e velocidade de entrada predefinidas.

#### 5.6.3.1 Premissas de vazão e propriedades

Os parâmetros operacionais e as propriedades dos fluidos utilizados para o dimensionamento estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 – Premissas de vazão e propriedades para o dimensionamento do ciclone (CI-01)

Parâmetro	Valor	Unidade	Justificativa
Vazão mássica T total de gás ( $F_{gás}$ )	30,47	kg/s	Soma do ar seco e água evaporada (balanço de massa)
Densidade do gás ( $\rho_g$ )	0,95	kg/m <sup>3</sup>	Densidade da mistura ar + vapor a 90 °C e 1,01325 bar
Densidade da partícula sólida ( $\rho_s$ )	500	kg/m <sup>3</sup>	Densidade aparente típica para pós de <i>spray drying</i> (Silva <i>et al.</i> , 2017)
Velocidade de Entrada ( $v_i$ )	15	m/s	Velocidade de projeto padrão, escolhida dentro da faixa de 10 a 20 m/s (valores de referência), pois equilibra alta eficiência de coleta com perdas de carga controladas (Coulson & Richardson, 2002).

Geometria Adotada	Padrão Stairmand	-	Relações geométricas que otimizam a eficiência e minimizam a perda de carga (Coulson & Richardson, 2002).
-------------------	------------------	---	---

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.6.3.2 Cálculo do diâmetro do ciclone ( $D_c$ )

##### a) Vazão volumétrica de gás ( $Q_v$ )

A vazão volumétrica do gás de exaustão é obtida dividindo-se a vazão mássica total pela densidade do gás, conforme a Equação E-12 (Anexo 1).

$$Q_v = 32,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

##### b) Diâmetro do ciclone ( $D_c$ )

O diâmetro do ciclone é determinado pela relação fundamental entre a vazão volumétrica ( $Q_v$ ), a velocidade de entrada ( $v_i$ ) e a área de entrada ( $A_i$ ). Para a geometria padrão Stairmand, esta relação é expressa na Equação E-13 (Anexo 1).

Para uma produção de 1.000 kg/h, o diâmetro projetado de cada ciclone é de aproximadamente 1,03 m. Assim, são requeridas quatro unidades em operação para assegurar a adequada separação do pó encapsulado.

Com base nesse valor teórico, foi aplicada uma folga de 10% sobre a vazão de projeto, que é uma prática usual em aplicações industriais para compensar incertezas e variações operacionais, e para garantir a estabilidade do sistema. Portanto, o diâmetro ajustado, que serve de base para a cotação (CAPEX), é ligeiramente maior:

$$D_c = 1,13 \text{ m}$$

#### 5.6.4 Especificação dos tanques de processo e estocagem (TQ)

O dimensionamento dos tanques de processo e estocagem é baseado na garantia de um tempo de residência suficiente para as etapas de mistura e para criar um estoque de segurança operacional.

O tempo de residência mínimo de 2 horas é um critério de projeto padrão que confere flexibilidade operacional e tempo para correções de processo. Além disso, o volume total ( $V_t$ ) é calculado com um fator de segurança de 25%, que é uma margem de projeto para acomodar a formação de espuma e a imprecisão de nível, evitando transbordamento (Peters et al., 2003).

#### 5.6.4.1 Detalhamento dos tanques de processo

O volume útil ( $V_u$ ) é determinado pela vazão volumétrica ( $Q_v$ ) e o tempo de residência ( $t = 2h$ ), conforme a Equação E-14 (Anexo 1).

O volume total ( $V_t$ ) é calculado pelo volume útil ( $V_u$ ) mais o fator de segurança de 25%.

Exemplo de cálculo (TQ-02 - Preparo de Emulsão):

Com vazão mássica total de 5389 kg/h, densidade de 1100 kg/m<sup>3</sup> e utilizando a equação E-14:

$$V_u = 9,798 \text{ m}^3$$

$$V_t = 12,25 \text{ m}^3$$

A Tabela 7 consolida os dados de vazão, densidade, e os volumes calculados para cada tanque, servindo como base para a cotação (CAPEX) do projeto.

Tabela 7 – Especificações de capacidade e materiais dos tanques de processo (TQ)

Parâmetro	TQ-01	TQ-02	TQ-03	TQ-04
Função	Mistura/Estocagem	Preparo de emulsão	Estocagem	Silo
Componentes	Água e encapsulante	Água, encapsulante e óleo	Óleo de laranja	Produto final (Pó)
Vazão total (kg/h)	4550,36	5389	216	1000
Densidade ( $\rho$ ) (kg/m <sup>3</sup> )	1050	1100	840	600
Volume útil ( $V_u$ ) (m <sup>3</sup> )	104,01	9,798	6,16	40
Volume total ( $V_t$ ) (m <sup>3</sup> )	130,01	12,25	7,7	50
Material de construção	Aço Carbono	Aço Inox 304	Aço Inox 304/316	Aço Inox 304
Pressão de Projeto (atm)	1	1	1	1
Requer agitador?	Sim	Sim	Não	Não

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.6.4.2 Potência estimada de agitação (TQ-01 e TQ-02)

Os tanques TQ-01 (mistura de solução) e TQ-02 (preparo de emulsão) são vasos de processo que exigem agitação mecânica. O TQ-01 necessita de energia para garantir a completa

dissolução do agente encapsulante, enquanto o TQ-02 requer potência para a dispersão do óleo e a estabilização da emulsão.

A potência do motor do agitador é estimada utilizando um critério de projeto de potência por volume ( $P/V$ ), um método que utiliza valores de referência aceitos na indústria e baseados em literatura especializada (PERRY *et al.*, 2008).

Valor de referência adotado:  $1,0 \text{ kW/m}^3$  de volume útil.

Este valor é típico para processos de mistura de média a alta intensidade e emulsificação que envolvem dispersão de fases (líquido-líquido e sólido-líquido), sendo uma prática consolidada em projetos preliminares (PERRY *et al.*, 2008).

O cálculo da potência estimada é realizado multiplicando o volume útil ( $V_u$ ) pelo valor de referência, conforme a Equação E-15 (Anexo 1):

- TQ-01:  $P_{\text{motor}} = 104,01 \text{ kW}$
- TQ-02:  $P_{\text{motor}} = 9,8 \text{ kW}$

#### 5.6.5 Especificação das bombas de transferência (B)

O dimensionamento das bombas de transferência foca na especificação da vazão mássica ( $Q$ ) e da altura manométrica ( $H$ ), parâmetros que definem a potência requerida. Para fins de estimativa de custo de capital (CAPEX), o custo de equipamento comprado (PEC) é rastreado por meio da potência de freio (BHP).

##### 5.6.5.1 Estimativa da altura manométrica total (H)

Em plantas químicas de pequeno/médio porte, a altura manométrica total ( $H$ ) é frequentemente estimada por valores de referência de projeto para cobrir perdas por atrito e elevações típicas, sem a necessidade de dimensionamento detalhado das tubulações.

Para bombas de processo de transferência de baixa pressão, os valores de referência da literatura indicam que a altura manométrica total ( $H$ ) costuma variar entre 30 e 50 metros de coluna de líquido (m.c.l.). A estimativa adotada para todas as bombas de transferência (B-01, B-02 e B-03) será de 40 m.c.l., um valor médio conservador que alinha o projeto com as práticas de estimativa técnica. (Peters *et al.*, 2003)

##### 5.6.5.2 Bomba B-01

A bomba B-01 transfere a solução de parede (corrente 3) do tanque TQ-01 para o TQ-02. Foi selecionada uma bomba centrífuga de aço inox 304, o tipo mais econômico e eficiente para fluidos de baixa viscosidade. O cálculo do BHP é realizado conforme a Equação E-16 (Anexo 1). A Tabela abaixo contém todos os parâmetros necessário para a cotação da bomba:

Tabela 8 – Especificações e potência da bomba B-01 (solução de parede)

Parâmetro	Valor	Unidade
Tipo de bomba	Centrífuga	-
Fluido	Solução de parede	-
Vazão total	4550,36	kg/h
Vazão volumétrica	4,33	m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica total (H)	40	m.c.l.
Eficiência da bomba ( $\eta$ )	0,6	-
Material de construção	Aço Inox 304 (SS304)	-
Potência de freio (BHP)	1,11	HP

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.6.5.3 Bomba B-02

A bomba B-02 tem a função de transferir o óleo essencial (corrente 4) do TQ-03 para o TQ-02. Foi selecionada uma bomba de deslocamento positivo (PD) para garantir a alta precisão na transferência da baixa vazão, sendo especificada em aço inox 316 (SS316) devido aos padrões sanitários e acidez do óleo. A Tabela abaixo contém todos os parâmetros necessário para a cotação da bomba:

Tabela 9 – Especificações da bomba B-02 (óleo essencial de laranja)

Parâmetro	Valor	Unidade
Tipo de bomba	Deslocamento positivo (PD)	-
Fluido	Óleo essencial de laranja	-
Vazão Total	215,56	kg/h
Vazão volumétrica	0,257	m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica total (H)	40	m.c.l.
Material de construção	Aço inox 316 (SS316)	-

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.6.5.4 Bomba B-03

A bomba B-03 transfere a emulsão de alimentação (corrente 5) do TQ-02. Uma bomba centrífuga em aço inox 316 foi escolhida para esta transferência suave e sanitária, operando a uma pressão de descarga de 5 bar. A Tabela abaixo contém todos os parâmetros necessário para a cotação da bomba:

Tabela 10 – Especificações da bomba B-03 (emulsão de alimentação)

Parâmetro	Valor	Unidade
Tipo de bomba	Centrífuga	-
Fluido	Emulsão (água, encapsulante e óleo)	-
Vazão total	5389	kg/h
Vazão volumétrica	4,899	m <sup>3</sup> /h
Pressão de descarga	5	bar
Material de construção	Aço Inox 316 (SS316)	-

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### 5.6.6 Especificação final de equipamentos auxiliares

Esta seção conclui a lista de equipamentos que serão estimados por capacidade, incluindo os equipamentos críticos de ar e a vedação do sistema de sólidos.

##### 5.6.6.1 Sistema de ar comprimido e filtragem

Esta especificação é vital para garantir a qualidade do produto (grau sanitário) e a estabilidade da atomização.

###### a) Filtros - sistema de compressão (FILT-01)

O tratamento do ar comprimido é uma decisão de engenharia crítica que atende a dois objetivos: segurança alimentar e estabilidade operacional do bico. A Tabela abaixo contém todos os parâmetros necessário para a cotação do filtro:

Tabela 11 – Especificação do Tratamento de Ar Comprimido (FILT-01)

Parâmetro	Valor/Tipo
Padrão de Qualidade	ISO 8573-1 Classe 1.2.1
Componentes Principais	Pós resfriador, secador por adsorção, filtro coalescente, filtro de carvão ativado.
Justificativa da Classe	A classe 1 de óleo e partículas garante a segurança alimentar (HACCP). A classe 2 de umidade (PDP – 40 °C) é mandatória para impedir o congelamento no bico atomizador.

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

#### b) Compressor de ar (C-01)

O compressor deve fornecer ar com as condições ideais para a atomização pneumática do bico de dois-fluidos. A Tabela abaixo contém todos os parâmetros necessário para a cotação do compressor:

Tabela 12 – Especificação do compressor de ar (C-01)

Parâmetro	Valor	Unidade
Serviço	Atomização pneumática	-
Condições de sucção	1,01325 (pressão) / 25 (temperatura)	bar / °C
Pressão de descarga	7	Bar
Vazão mássica	5400	kg/h
Vazão volumétrica (Standard)	4176,33	Nm <sup>3</sup> /h

Fonte: Elaborado pelas discentes (2025).

A pressão de 7 bar é o padrão industrial, otimizando o CAPEX. A vazão mássica de 5400 kg/h é uma estimativa FEL baseada na relação ar/líquido de 1.0 (em massa) em relação à vazão de emulsão do balanço de massa.

## 5.7 Estimativa de custos e análise econômico-financeira

A estimativa de custos e a análise econômico-financeira foram realizadas com o objetivo de avaliar a viabilidade da implantação da unidade de encapsulamento de óleo essencial de laranja por *spray drying*. As estimativas foram elaboradas em reais (R\$), com ano-base 2025, considerando a taxa de câmbio média PTAX de outubro de 2025 (US\$ 1,00 = R\$ 5,3890).

### 5.7.1 Investimento inicial

O investimento total do projeto foi segmentado em investimento indireto, investimento direto (ISBL e OSBL), despesas financeiras durante a construção e capital de giro. Conforme a Tabela de Investimento (Anexo 3), o valor total estimado foi de R\$ 77.347.204,30.

O investimento indireto totalizou R\$ 13.685.868,87, abrangendo estudos de viabilidade, gerenciamento, *know-how*, projeto básico e detalhamento, serviços de diligenciamento, pré-operação e contingências. O investimento direto somou R\$ 47.246.956,05, sendo R\$

26.248.308,92 referentes ao investimento ISBL e R\$ 20.998.647,13 ao investimento OSBL (infraestrutura e utilidades).

Entre os principais equipamentos do investimento ISBL, cujos custos detalhados somam R\$ 10.415.995,60 (Tabela de Equipamentos Principais – Anexo 4), destacam-se:

- Secador por atomização (SD-01): Principal equipamento do processo, cujo preço de referência foi obtido através de cotação específica (MF Rural, 2024);
- Trocador de calor (TC-01): Dois trocadores casco-tubo, com base em cotações de equipamentos industriais em aço inoxidável (MF Rural, 2024);
- Ciclone de separação (CI-01): Quatro unidades cotadas em mercado nacional, conforme anúncios de sistemas de separação industrial (MF RURAL, 2025);
- Tanques de processo (TQ-01 a TQ-04): Valores obtidos a partir de anúncios e catálogos de fornecedores nacionais (MXM, [s.d.]);
- Bombas (B-01, B-02 e B-03): Selecionadas com base em equipamentos fabricados em aço inox 304/316 de padrão sanitário (INDÚSTRIA INOX BRASIL, 2025; TECNOINOX, 2025; BOMBINOX, 2025);
- Sistema de filtração (FILT-01): Modelo AriaDry® da fabricante nacional Metalplan Artec (METALPLAN ARTEC, 2025);
- Compressor de ar (C-01): Conjunto de três compressores de parafuso, equivalente à linha MSW Series da Schulz do Brasil (SCHULZ DO BRASIL, 2025).

### 5.7.2 Custos e receita operacionais

O preço de venda do aroma encapsulado foi estabelecido em R\$ 130,00/kg de produto, resultando em uma receita anual de R\$ 936.000.000,00. Este preço foi definido a partir de uma análise comparativa de valores praticados no mercado internacional para produtos equivalentes (ORIENT FLAVOUR, 2025; ACCIO, 2025).

Após a definição do preço de venda baseado nas práticas de mercado, foram estimados e organizados os custos operacionais da planta, permitindo avaliar a margem operacional e a sustentabilidade econômica do processo.

Os custos variáveis anuais somaram R\$ 879.922.401,41 (Tabela de Custo Variável – Anexo 5), compostos por matérias-primas, utilidades e tratamento de rejeitos.

As matérias-primas compreendem:

- Óleo essencial de laranja, com cotação direta (IDEAL CITRUS, 2025);
- Capsul®, obtido por cotação direta (INGREDION, 2025);

- Água de Processo.

Utilidades e tratamento de rejeitos: incluem energia elétrica, água de processo e industrial, ar comprimido, vapor, tratamento de efluentes e resíduos sólidos.

Os custos fixos anuais totalizaram R\$ 10.604.598,19 (Tabela de Custo Fixo - Anexo 6) e englobam mão de obra de operação, manutenção, materiais de manutenção, seguros, taxas, despesas gerais e administrativas, despesas financeiras e depreciação.

### 5.7.3 Análise econômico-financeira

A análise econômico-financeira foi baseada no fluxo de caixa (Anexo 7) projetado para 30 anos, com uma TMA de 15% a.a. Os resultados indicam VPL de R\$ 354.225.234,70 e TIR de 35% a.a., demonstrando alta atratividade financeira.

## 5.8 Análise da vida útil da planta industrial

A vida útil da planta foi definida como 30 anos para refletir a durabilidade física esperada dos ativos principais do processo, em alinhamento com o ciclo de vida esperado para instalações industriais que utilizam aço inoxidável. Este período estabelece o horizonte de projeção do fluxo de caixa (Anexo 7) e representa o intervalo no qual a operação permanece tecnicamente sustentável e economicamente viável antes da obsolescência.

Para fins de cálculo, a depreciação anual considerada é de R\$ 3.056.090,61, distribuída ao longo dos 30 anos. O valor residual final, de R\$ 7.734.720,43, representa o valor de salvamento e o potencial de reaproveitamento dos ativos remanescentes ao término do 30º ano.

A definição de 30 anos é tecnicamente viável, pois os principais equipamentos do projeto – como o *spray dryer*, trocador de calor, ciclone e tanques – são construídos em aço inoxidável 304/316. Esses materiais conferem aos ativos uma vida útil física superior a 20 anos, suportando a operação contínua e as exigências sanitárias típicas da indústria alimentícia, desde que haja manutenção preventiva adequada.

Desse modo, o período de 30 anos representa o intervalo no qual a planta mantém desempenho técnico estável e geração de caixa compatível com os objetivos de longo prazo do estudo econômico, assegurando a coerência entre a análise financeira e a vida útil real do projeto.

## 5.9 Condições operacionais de risco e segurança de processos

A operação de uma planta de *spray drying* envolve riscos relacionados a altas temperaturas, vapor, compostos orgânicos voláteis, poeiras combustíveis, equipamentos rotativos, sistemas elétricos e geração de efluentes. A identificação desses riscos permite estabelecer controles operacionais adequados para garantir segurança, continuidade do processo e conformidade com os requisitos legais aplicáveis.

### 5.9.1 Riscos térmicos e de sobretemperatura

Materiais orgânicos submetidos a temperaturas elevadas podem gerar vapores inflamáveis e produtos de oxidação (BIBLIOTECA DE SEGURANÇA INDUSTRIAL, 2019). A operação com ar aquecido a 200 °C exige controle rigoroso de temperatura, intertravamentos, isolamento térmico e redundância de instrumentos para evitar degradação do óleo essencial e risco de ignição.

### 5.9.2 Riscos de vapor e ar quente

O uso de vapor no aquecimento do ar envolve riscos de vazamentos, queimaduras e sobrepressão. As medidas de segurança incluem válvulas de alívio, drenos, purgas e isolamento térmico das linhas e equipamentos, conforme práticas gerais de segurança industrial (BIBLIOTECA DE SEGURANÇA INDUSTRIAL, 2019).

### 5.9.3 Riscos de explosão de poeira

Poeiras combustíveis dispersas podem gerar atmosferas explosivas, especialmente em *spray dryers*, ciclones e linhas pneumáticas (REDE E-TEC BRASIL, 2012). Para mitigação, utilizam-se aterramento, painéis de alívio de explosão, limpeza frequente e controle de acúmulo de pó.

### 5.9.4 Riscos mecânicos e pressurização

Discos atomizadores, bombas e compressores apresentam risco de falha mecânica, projeção de partículas e vibração excessiva. As medidas incluem enclausuramento, monitoramento de vibração e válvulas de alívio, conforme boas práticas de manutenção industrial (BIBLIOTECA DE SEGURANÇA INDUSTRIAL, 2019).

### 5.9.5 Riscos químicos

O limoneno presente no óleo essencial é volátil e sujeito à oxidação, podendo gerar vapores irritantes e inflamáveis (SEDUC, 2014). A mitigação envolve ventilação, sistemas fechados de transferência e armazenamento climatizado.

### 5.9.6 Riscos elétricos e de parada súbita

Falhas de energia podem interromper a atomização, favorecer acúmulo de produto e elevar risco térmico. Sistemas de Alimentação Ininterrupta (UPS) garantem continuidade dos controles críticos e permitem parada segura (LANGA, 2017).

### 5.9.7 Riscos ocupacionais

A exposição a poeiras, ruído e manipulação manual de cargas pode gerar impactos à saúde. São adotados EPIs, aspiração localizada e ergonomia adequada.

### 5.9.8 Riscos ambientais

Considerando os requisitos legais aplicáveis e a rotina operacional da planta, os efluentes contendo sólidos orgânicos devem ser enviados para tratamento adequado, atendendo plenamente à CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011). O processo também gera correntes líquidas e resíduos sólidos que precisam ser segregados, armazenados e descartados conforme normas ambientais, garantindo rastreabilidade e evitando contaminação do solo e da água.

Além disso, é necessário o controle das emissões atmosféricas, especialmente de partículas finas provenientes do *spray dryer*, ciclone e transporte pneumático. A adoção de sistemas de retenção, monitoramento contínuo e manutenção preventiva reduz o impacto ambiental e assegura conformidade com limites de emissões previstos em licenças de operação.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no EVTE confirmam a viabilidade econômica da implantação da unidade industrial de encapsulamento de óleo essencial de laranja via *spray drying*. Para um horizonte de 30 anos e considerando uma TMA de 15% ao ano, os indicadores financeiros demonstraram elevada atratividade: o VPL alcançou R\$ 354,23 milhões, a TIR foi de 35% ao ano e o *payback* estimado foi de aproximadamente 34 meses, evidenciando recuperação rápida

do investimento inicial. Esses valores também demonstram alinhamento com o comportamento típico de projetos industriais de médio porte com alto valor agregado.

A solidez dos resultados é sustentada pela diferença favorável entre receita e custos anuais. A receita projetada, de R\$ 936 milhões ao ano, supera significativamente os custos operacionais totais, estimados em R\$ 890,53 milhões/ano, garantindo margem operacional positiva mesmo em cenário conservador. O CAPEX total, de R\$ 77,35 milhões, reflete valores coerentes para o porte e a complexidade da unidade proposta, apresentando compatibilidade com preços de mercado para equipamentos industriais, especialmente aqueles de origem internacional, e validando a consistência técnica da estimativa de investimento.

A estrutura dos custos fixos e variáveis foi construída de forma consistente, considerando os elementos essenciais para manter a operação contínua da planta, como mão de obra, manutenção, utilidades, despesas administrativas e depreciação. Essa composição sólida dos custos operacionais reforça a confiabilidade dos resultados financeiros e garante que o fluxo de caixa projetado represente com precisão o desempenho econômico esperado ao longo da vida útil da unidade industrial. Dessa forma, os indicadores obtidos demonstram uma viabilidade sólida, com retorno rápido e desempenho alinhado às expectativas do estudo.

## 7 CONCLUSÃO

A implantação da unidade industrial de encapsulamento de aromas por *spray drying*, objeto deste EVTE, demonstrou ser viável sob os aspectos técnicos e econômicos.

A fase inicial do estudo, dedicada à revisão bibliográfica do estado da arte, confirmou que a tecnologia de *spray drying* é uma opção tecnicamente adequada para o projeto, devido à sua eficácia na otimização da fixação, estabilidade e durabilidade dos compostos voláteis, justificando sua adoção. Com base nesse embasamento técnico, o projeto avançou para a definição da capacidade produtiva da planta, estabelecida em 7.200 toneladas por ano, uma escala compatível com as demandas industriais e de importação e exportação.

O núcleo do estudo, focado na estimativa dos investimentos e do retorno financeiro, confirmou a alta atratividade do empreendimento. O CAPEX foi dimensionado em R\$ 77,35 milhões, sendo compensado por um desempenho financeiro robusto ao longo do horizonte de 30 anos. A análise financeira, que considerou a TMA de 15% ao ano como referência, resultou em um VPL de R\$ 354,23 milhões e uma TIR de 35% ao ano, superando a TMA com ampla margem. O retorno do capital investido é projetado para ocorrer em um tempo de retorno (*payback*) acelerado de aproximadamente 34 meses.

Em suma, com a validação de todos os aspectos técnicos, operacionais e financeiros, conclui-se que a implantação da unidade industrial proposta é altamente vantajosa, apresentando um potencial de retorno expressivo e sustentado. Para estudos futuros, recomenda-se investigar estratégias de redução de custos de insumos de especialidade, como o agente encapsulante Capsul, e a adoção de práticas sustentáveis, como recuperação energética e reuso de água, visando aprimorar ainda mais a competitividade e a eficiência do processo.

## REFERÊNCIAS

- ABURTO, D. D. L. C. Microencapsulação de óleo essencial de laranja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 89-97, 1998.
- ACCIO. **Microencapsulated Orange Flavour Powder (Spray Dried)**. [S. l.]: Accio, [2025]. Disponível em: <https://pt.accio.com/>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- ADAMIEC, J.; BEM, Z. Analysis of microencapsulation ability of essential oils during spray drying. **Drying Technology**, Philadelphia/London, v. 24, n. 9, p. 1127-1132, 2006.
- AFEBRAS. A importância dos aromas na produção de alimentos. 13 jul. 2023. Disponível em: <https://afrebras.org.br/noticias/a-importancia-dos-aromas-na-producao-de-alimentos/>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- AFOADWAH, A.; AL-ALAM, M. **Spray Drying as an Appropriate Technology for the Food and Pharmaceutical Industries - A Review**. 2012.
- ALIMENTOS SEM MITOS. **Aromatizantes sintéticos idênticos aos naturais são os mais usados em alimentos processados**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://alimentossemmitos.com.br/aromatizantes-sinteticos-identicos-aos-naturais-sao-os-mais-usados-em-alimentos-processados>. Acesso em: 05 abr. 2025.
- ANVISA. Resolução RDC nº 2, de 15 de janeiro de 2007. **Regulamento técnico sobre aditivos aromatizantes**. Diário Oficial da União, Brasília, 15 jan. 2007. Disponível em: [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2007/rdc0002\\_15\\_01\\_2007.html](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2007/rdc0002_15_01_2007.html). Acesso em: 15 mar. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS (ABIA). **ABIA: Indústria de alimentos criou 72 mil empregos diretos em 2024, número de trabalhadores na cadeia produtiva chega a 10,4 milhões (10,1% do total das pessoas ocupadas no Brasil)**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.abia.org.br/releases/abia-industria-de-alimentos-criou-72-mil-empregos-diretos-em-2024-numero-de-trabalhadores-na-cadeia-produtiva-chega-a-104-milhoes-101-do-total-das-pessoas-ocupadas-no-brasil>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- AZEREDO, H. M. C. de. Encapsulação: aplicação à tecnologia de alimentos. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 16, n. 1, p. 89-97, 2005.
- BARANAUSKIENE, R. et al. Properties of oregano (*Origanum vulgare* L), citronella (*Cymbopogon nardus* G.) and marjoram (*Majorana hortensis* L.) flavors encapsulated into milk protein-based matrices. **Food Research International**, Barking, Essex, v. 39, n. 4, p. 413-421, 2006.
- BARBOSA, P. T.; PINHEIRO, N. P. M.; SANTOS JUNIOR, W. L. Metodologia FEL: Sua importância na avaliação de riscos e redução de impactos em escopo, tempo e custo de

projetos complexos de engenharia. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXXIII, 2013, Salvador. **Anais**. Salvador: ENEGEP, 2013.

BARROSO, T. L. C. et al. Tecnologia de encapsulamento na área de alimentos: Uma revisão. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. e6210716240, 2021. Disponível em: <https://orcid.org/0000-0002-0133-2969>. Acesso em: 01 mar. 2025.

**BIBLIOTECA DE SEGURANÇA INDUSTRIAL**. *Segurança Industrial: Safety e Security*. 2019. Disponível em: <https://www.bibliotecadeseguranca.com.br/wp-content/uploads/2019/01/seguranca-industrial-safety-e-security.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

BIZZO, Humberto R.; REZENDE, Claudia M. O mercado de óleos essenciais no Brasil e no mundo na última década. **Química Nova**, v. 45, n. 8, p. 949–958, 2022. DOI: 10.21577/0100-4042.20170889.

BOMBINOX EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. **Bomba centrífuga sanitária inox 316**. Joinville, SC, [s.d.]. Disponível em: <https://bombinox.com.br/produto/bomba-centrifuga-sanitaria>. Acesso em: 09 nov. 2025.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes. Brasília, 2011. Disponível em: [https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA\\_n.430.2011.pdf](https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf). Acesso em: 09 nov. 2025.

CANAL RURAL. **Faturamento da indústria de alimentos no Brasil cresceu 7,2% em 2023**. 2024. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/economia/faturamento-da-industria-de-alimentos-no-brasil-cresceu-72-em-2023/>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CARMONA, L. V. M. et al. Microencapsulamento de extrato de própolis por spray drying utilizando goma arábica e maltodextrina. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 2486-2500, 2018. Disponível em: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/portuguese-english/artigo>. Acesso em: 05 set. 2025.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. **Coulson and Richardson's Chemical Engineering**. Vol. 2: Particle Technology and Separation Processes. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

DA SILVA, M. L.; FONTES, A. A. **DISCUSSÃO SOBRE OS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA: VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL), VALOR ANUAL EQUIVALENTE (VAE) E VALOR ESPERADO DA TERRA (VET)**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais.

E MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A.; TRUGO, L. C. Componentes voláteis do café torrado. Parte I: compostos heterocíclicos. **Química Nova**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 209-217, abr. 1999. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/h5q88k99FSfSrcrtpdmJXFH/?lang=pt>. Acesso em: 2 dez. 2025.

ENGIUM. **CEB quer usar um microrganismo para tornar produção de aromas mais sustentável**. Universidade do Minho, [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.engium.uminho.pt/ceb-quer-usar-um-microrganismo-para-tornar-producao-de-aromas-mais-sustentavel/>. Acesso em: 05 abr. 2025.

FACT.MR. **Citrus Essential Oil Market Share and Statistics - 2034**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.factmr.com/report/2851/citrus-essential-oil-market>. Acesso em: 15 ago. 2025.

FERRARI, C. C. et al. Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying. **International Journal of Food Science & Technology**, [S. l.], v. 47, n. 6, p. 1237-1246, 2012.

FERREIRA, L. A. et al. Estudo da gelificação iônica na microencapsulação de fragrâncias. In: **SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA (SICITE)**, 2019. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2019/paper/viewFile/4950/1714>. Acesso em: 15 mar. 2025

FERRONATTO, C.; ROSSI, M. **Obtenção e Caracterização do Óleo Essencial de Laranja Obtido a Partir de Resíduos de *Citrus sinensis* 'Valencia'**. ResearchGate, [S. l.], 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/361960733\\_Obtencao\\_e\\_Caracterizacao\\_do\\_Oleo\\_Essencial\\_de\\_Laranja\\_Obtido\\_a\\_Partir\\_de\\_Residuos\\_de\\_Citrus\\_sinensis\\_Valencia](https://www.researchgate.net/publication/361960733_Obtencao_e_Caracterizacao_do_Oleo_Essencial_de_Laranja_Obtido_a_Partir_de_Residuos_de_Citrus_sinensis_Valencia). Acesso em: 10 ago. 2025.

GASTRONOMYLAB. **Capsul**. [S. l.]: GastronomyLab, [2025]. Disponível em: <https://loja.gastronomylab.com/produtos/capsul1/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GERANPOUR, M.; ASSADPOUR, E.; JAFARI, S. M. Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils. **Trends in Food Science & Technology**, [S. l.], v. 102, p. 250-264, 2020.

GONÇALVES, C. C. M. et al. Microencapsulação de óleo essencial de laranja por secagem por atomização: influência de parâmetros do processo na eficiência de encapsulamento. **Revista Brasileira de Pesquisa em Alimentos**, [S. l.], v. 8, n. 2, [2017].

IDEAL CITRUS. **Cotação Óleo Essencial de Laranja Doce (IBC 1000L)**. [S. l.]: Ideal Citrus do Brasil, [2025]. [Cotação Direta B2B]. Acesso em: 12 nov. 2025.

INDÚSTRIA INOX BRASIL. **Bomba centrífuga sanitária inox 304**. Guarulhos, SP, [s.d.]. Disponível em: <https://industriainoxbrasil.com.br/produto/bomba-centrifuga-sanitaria-inox-304>. Acesso em: 09 nov. 2025.

INGREDION. **CAPSUL®: Product Data Sheet**. [S. l.]: Ingredion, 2024. 2 p. [Ficha técnica].

INGREDION. **Cotação Agente Encapsulante CAPSUL (Preço de Lista Industrial)**. [S. l.]: Ingredion Brasil Ingredientes, [2025]. [Cotação Direta B2B]. Acesso em: 12 nov. 2025.

ISLAM, M. N. et al. Health Benefits and Spray Drying Microencapsulation Process of Fish Oil (Omega-3). **American Journal of Food Science and Nutrition Research**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 43-48, 2018.

IZZO, H. R.; REZENDE, C. M. O mercado de óleos essenciais no Brasil e no mundo na última década. **Química Nova**, [S. l.], v. 45, n. 8, p. 949-958, 2022.

JOMORI, L. M. et al. Determinantes da escolha alimentar humana: uma revisão de estudos. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 33, e190213, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rn/a/kgXSTmYNgrjFQjCY9HWGPgv/?lang=pt>. Acesso em: 05 abr. 2025.

LANGA, Juvenal S. **Fonte de Alimentação Ininterrupta (UPS)**. **Energypedia**, 2017. Disponível em: [https://energypedia.info/images/0/08/PT\\_FONTE\\_DE\\_ALIMENTA%C3%87%C3%83O\\_ININTERRUPTA-Juvenal.\\_S.\\_Langa.pdf](https://energypedia.info/images/0/08/PT_FONTE_DE_ALIMENTA%C3%87%C3%83O_ININTERRUPTA-Juvenal._S._Langa.pdf). Acesso em: 21 nov. 2025.

LIU, Z. Z. The enhancement and encapsulation of Agaricus bisporus flavor. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 65, p. 493-500, 2014.

MARIA, C. A. B. de; MOREIRA, R. F. A.; TRUGO, L. C. Componentes voláteis do café torrado. Parte I: compostos heterocíclicos. **Revista Brasileira de Ciências Fisiológicas**, [S. l.], v. 9, p. 55-65, 1998.

MARTINS, M. N. **Aplicação de poliestireno na microencapsulação**. 2015. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2385/1/PG\\_PPGEP\\_M\\_Martins%2C%20Marcelo%20Natan\\_2015.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2385/1/PG_PPGEP_M_Martins%2C%20Marcelo%20Natan_2015.pdf). Acesso em: 15 mar. 2025.

MENDONÇA, A. C. et al. Óleos essenciais naturais e sintéticos: benefícios na indústria de fragrâncias. **Revista de Química**, [S. l.], v. 28, n. 136, jul. 2024.

METALPLAN ARTEC. **Sistema de tratamento de ar comprimido AriaDry® – pós-resfriador, secador e filtros coalescentes**. São Paulo, SP, [s.d.]. Disponível em: <https://metalplan.com.br/produtos/secadores>. Acesso em: 09 nov. 2025.

MF RURAL. **Câmara de secagem spray dryer**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/820470/camara-de-secagem-spray-dryer>. Acesso em: 09 nov. 2025.

MF RURAL. **Trocador de calor inox – anúncios e cotações**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/busca/trocador-calor-inox>. Acesso em: 09 nov. 2025.

MUSTAFA, G. S. **Avaliação econômica de projetos industriais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MXM INDÚSTRIA DE TÔNEIS EIRELI. **Tanque inox 304 – 50.000 litros: dorna, reservatório**. Loja MXM, [s.d.]. Disponível em: <https://loja.mxm.ind.br/tanque-inox-304-50000-litros-dorna-reservatorio>. Acesso em: 09 nov. 2025.

NEVES, S. B. **Metodologia FEL e EVTE**. [S. l.]: [s. n.].

NORMAS ABNT. **Tabelas**. São Paulo: Normas ABNT (ESPM), 11 abr. 2025. Disponível em: <https://normas-abnt.espm.br/index.php?title=Tabelas>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ORIENT FLAVOUR. **Microencapsulated Orange Flavour Powder (Spray Dried)**. [S. l.]: Orient Flavour, [2025]. Disponível em: <https://www.orientrelogios.com.br/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

OZKAN, G. et al. Microencapsulation of phenolic compounds: a critical review on microcapsule formation, characterization and application. **Food Research International**, [S. l.], v. 124, p. 108428, 2019.

PACCOLA, M. E. D. Microencapsulação de compostos voláteis: Aplicações em fragrâncias e alimentos. **Journal of the Development of Science and Engineering**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 11-16, 2017. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/jdsci/article/view/126459>. Acesso em: 15 mar. 2025.

PACCOLA, M. T. **Liberação controlada de fragrância, teste com consumidor e análise sensorial de produto cosmético contendo óleo essencial de Citrus sinensis (L.) Osbeck microencapsulado**. 2017. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/69478>. Acesso em: 15 mar. 2025.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; WEST, R. E. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

PORTO, C.; SALIS, R.; OLIVAREZ, S. **Aromatizantes em alimentos**. [S. l.]: Slideshare, 2016. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/pachelly/aromatizantes>. Acesso em: 10 abr. 2025.

QS. A importância dos aromatizantes naturais e sintéticos na indústria alimentícia. **Química Nova na Escola**, [S. l.], n. 39, n. 2, p. 113-118, 2016. Disponível em: [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39\\_2/04-QS-09-16.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39_2/04-QS-09-16.pdf). Acesso em: 10 abr. 2025.

QUEROBOLSA. **Quanto ganha um engenheiro químico?**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/carreiras-e-profissoes/engenheiro-quimico/salario>. Acesso em: 09 nov. 2025.

REDE E-TEC BRASIL. **Segurança do Trabalho: Riscos Ambientais. Ministério da Educação, 2012.** Disponível em: [https://redeotec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_amb\\_saude\\_seguranca/tec\\_seguranca/seg\\_trabalho/291012\\_seg\\_trab\\_a10.pdf](https://redeotec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_amb_saude_seguranca/tec_seguranca/seg_trabalho/291012_seg_trab_a10.pdf). Acesso em: 21 nov. 2025.

REINECCIUS, G. **Flavor Chemistry and Technology**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

ROSENBERG, M.; TUNG, R. Y.; KING, C. J. The influence of colloidal and other solution properties on the deposition of solids during spray drying. **Journal of Food Science**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 1109-1114, 1990.

SAIFULLAH, M. Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds. A critical review. **Trends in Food Science & Technology**, [S. l.], v. 86, p. 182-192, 2019.

SALARIO.COM.BR. **Mestre da indústria de produtos alimentícios: salário 2024**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/mestre-de-industria-de-produtos-alimenticios-cbo-830105/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SALARIO.COM.BR. **Operador de produção: salário médio no Brasil**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/operador-de-producao/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SALARIO.COM.BR. **Técnico de manutenção industrial: salário médio no Brasil**. [S. l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/tecnico-de-manutencao-industrial/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SANCHES, E. **Avaliação de diferentes materiais para microencapsulação de óleo essencial de laranja por secagem por atomização**. 2023. 55 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2023.

SCHULZ DO BRASIL. **Compressor de ar parafuso – Linha MSW Series**. Joinville, SC, [s.d.]. Disponível em: <https://www.schulz.com.br/produto/compressor-parafuso-msw-series/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SEDUC. **Segurança do Trabalho – EPI e EPC**. Governo do Estado do Ceará, 2014. Disponível em: [https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/seguranca\\_do\\_trabalho\\_EPI\\_e\\_EPC\\_2014.pdf](https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/seguranca_do_trabalho_EPI_e_EPC_2014.pdf). Acesso em: 21 nov.

SHISHIR, M. R.; CHEN, W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit juices and dairy products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [S. l.], v. 57, n. 13, p. 2736-2751, 2017.

SIEGMUND, B. Biogenesis of aroma compounds: flavour formation in fruits and vegetables. In: PARKER, J. K.; ELMORE, J. S.; METHVEN, L. (Ed.). **Flavour Development, Analysis and Perception in Food and Beverages**. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 127-149.

SILVA, J. R. **Uso de biopolímeros na encapsulação de compostos voláteis**. 2021. [Faltam o tipo de trabalho, o local e o número de páginas.] Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/9447>. Acesso em: 01 mar. 2025.

SILVA, S. L. G. da. **Desidratação de suco de acerola verde por spray dryer com diferentes agentes carreadores**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SILVESTRE, A. **Aplicações dos Componentes Majoritários do Óleo Essencial de Citros. Projeto Integrador - Óleo Essencial de Laranja**. [S. l.], 2018. [Falta o tipo de trabalho e o número de páginas.] Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/844354955/Projeto-Integrador-OLEO-ESSENCIAL-DE-LARANJA-OFICIAL>. Acesso em: 05 abr. 2025.

SINNOTT, R. K. **Chemical Engineering Design**. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

SULTANA, A. et al. Microencapsulation of flavors by spray drying using *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of Food Engineering**, [S. l.], v. 199, p. 110-117, 2017.

TECNOINOX BOMBAS INDUSTRIAIS. **Bombas lóbulos inox**. Limeira, 2025. Disponível em: <https://tecnoinox.com.br/bombas-lobulos-inox>. Acesso em: 12 nov. 2025.

TRIBOLI, E. P. **Estudo e otimização de processo de secagem de iogurte por atomização com secador em escala piloto**. 2014.

TURTON, Richard et al. **Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes**. 5. ed. Boston: Pearson Education, 2018.

YAMASAKI, F. Y. **Aplicação da tecnologia de spray-drying em encapsulação de aromas na indústria de alimentos**. 2020. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Farmácia) - Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2020.

## ANEXOS

### Anexo 1 – Equações

E-1 — Calor Necessário para Evaporação (BE)

$$Q_{nec} = F \cdot \lambda$$

E-2 — Vazão Mássica de Ar Seco (BE)

$$\dot{F}_{ar} = \frac{Q_{nec}}{C_{p,ar} \Delta T_{mp} (1 - P)}$$

E-3 — Calor Total Fornecido pelo Ar (BE)

$$Q_{total} = \frac{Q_{nec}}{(1 - P)}$$

E-4 — Volume Teórico da Câmara (Spray Dryer)

$$V_{câmara} = \frac{F_s}{TEV}$$

E-5 — Diâmetro do Spray Dryer

$$D = \sqrt[3]{\frac{2 V_{projeto}}{\pi}}$$

E-6 — Volume de Projeto Final (Spray Dryer)

$$V_{projeto} = V_{câmara} \cdot 1,10$$

E-7 — Vazão Mássica de Vapor Requerida (TC-01)

$$F_{vapor} = \frac{Q_{total}}{\Delta H_{vapor}}$$

E-8 — Diferença de Temperatura Média Logarítmica (TC-01)

$$\Delta T_{ML} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

E-9 — Área de Troca Térmica (TC-01)

$$A = \frac{Q_{\text{total}}}{U \cdot \Delta T_{ML}}$$

E-10 — Diferença na Entrada do Ar ( $\Delta T_1$ )

$$\Delta T_1 = T_v - T_{ar,entrada}$$

E-11 — Diferença na Saída do Ar ( $\Delta T_2$ )

$$\Delta T_2 = T_v - T_{ar,saída}$$

E-12 — Vazão Volumétrica de Gás (Ciclone)

$$Q_v = \frac{F_s}{\rho_s}$$

E-13 — Diâmetro do Ciclone (Geometria Stairmand)

$$D_C = \sqrt[3]{\frac{Q_v}{\pi \cdot 0,125}}$$

E-14 — Volume Útil do Tanque ( $V_{\text{útil}}$ )

$$V_{\text{útil}} = \frac{\dot{m}_b}{\rho_b} \cdot t$$

E-15 — Potência Estimada do Agitador ( $P_{\text{motor}}$ )

$$P_{\text{motor}} = V_{\text{útil}} \cdot 1,0 \text{ kW/m}^3$$

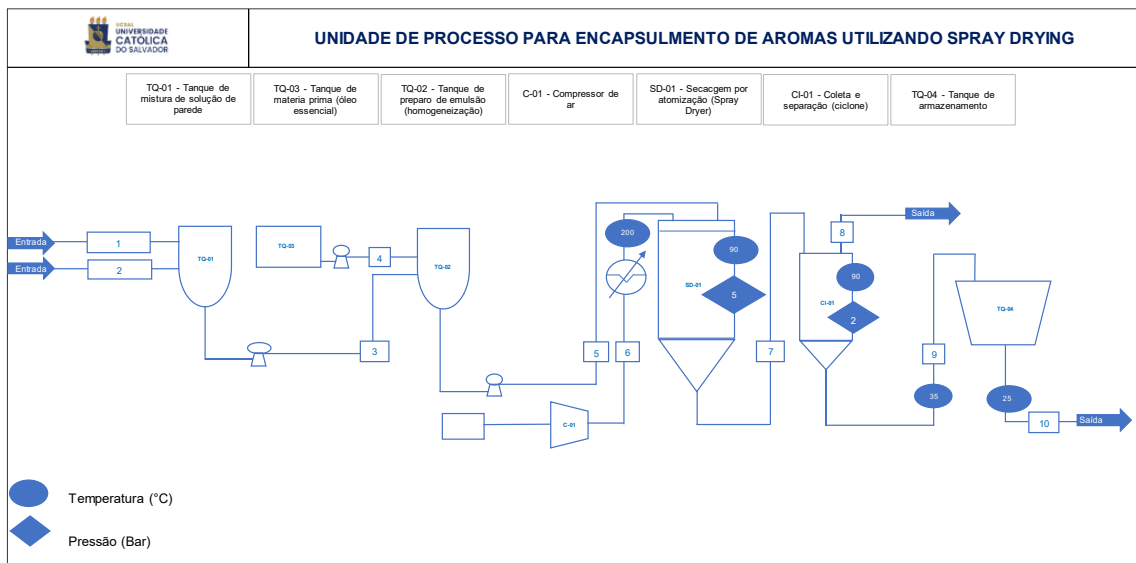
E-16 — Potência de Freio da Bomba (BHP)

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot \rho}{\eta}$$

E-17 — Potência Teórica do Compressor ( $\dot{W}_{\text{teórica}}$ )

$$\dot{W}_{\text{teórica}} = \dot{m} \cdot R \cdot T_1 \cdot \frac{1}{n-1} \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

## Anexo 2 - Diagrama de Processo - PFD e Tabela de Balanço de Massa



Correntes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Água Potável/Industrial	Agente Encapsulante	Solução de Parede	Óleo Essencial de Laranja	Emulsão de Alimentação	Ar de Secagem Quente	Gás de Exaustão	Gás Tratado	Pó Encapsulado Bruto	Produto Final (pó)
<b>Temperatura (°C)</b>	25	25	25	25	25	200	90	25	35	25
<b>Pressão (barr)</b>	1,01325	1,01325	1,01325	1,01325	1,01325	5	2	1,01325	1,01325	1,01325
<b>Carga (kg/h)</b>	4311,12	862,22	5173,34	215,56	5388,9	107505	111787	111787	1107,78	1000
<b>Composição</b>										
<b>Água Potável/Industrial</b>	100%	-	83%	-	80%	-	4%	4%	3%	3%
<b>Agente Encapsulante</b>	-	100%	17%	-	16%	-	-	-	-	-
<b>Óleo Essencial de Laranja</b>	-	-	-	100%	4%	-	-	-	-	-
<b>Ar de Secagem Quente</b>	-	-	-	-	-	100%	95%	96%	-	-
<b>Pó Encapsulado Bruto</b>	-	-	-	-	-	-	1%	-	97%	97%
<p>* As correntes e equipamentos que não constam os dados de temperatura e pressão no PFD acima, significa que estão em condições normais de T e P (25°C e 1,01325 bar)</p> <p>* dados de processos da corrente 6 é aplicável somente após o trocador de calor. A montante do trocador as condições de T e P são normais.</p>										

## Anexo 3 - Tabela de Investimento

	Investimento	TOTAL (R\$)
<b>1.0</b>	<b>Investimento indireto</b>	<b>R\$ 13.685.868,27</b>
1.1	Estudo de viabilidade	R\$ 141.740,87
1.2	Gerenciamento do empreendimento	R\$ 3.712.665,81
1.3	know-how	R\$ 1.574.898,54
1.4	Projeto básico	R\$ 787.449,27
1.5	Projeto de detalhamento	R\$ 2.834.817,36
1.6	Serviços de procura, inspeção e diligenciamento	R\$ 787.449,27
1.7	Pré-operação	R\$ 472.469,56
1.8	Contingências	R\$ 7.087.043,41
<b>2.0</b>	<b>Investimento Direto</b>	<b>R\$ 47.246.956,05</b>
<b>2.1</b>	<b>Investimento ISBL</b>	<b>R\$ 26.248.308,92</b>
2.1.1	Terreno e melhorias	R\$ 944.939,12
2.1.2	Equipamentos principais	R\$ 10.415.995,60
2.1.3	Materiais de aplicação	R\$ 7.395.356,88
2.1.3.1	Tubulação	R\$ 4.791.357,98
2.1.3.2	Instrumentação	R\$ 1.562.399,34
2.1.3.3	Materiais elétricos	R\$ 729.119,69
2.1.3.4	Isolamentos	R\$ 208.319,91
2.1.3.5	Pintura	R\$ 104.159,96
2.1.4	Fundações e estruturas	R\$ 1.562.399,34
2.1.5	Obras civis	R\$ 1.041.599,56
2.1.6	Montagem industrial	R\$ 4.895.517,93
2.1.6.1	Instalação dos equipamentos	R\$ 2.083.199,12
2.1.6.2	Instalação dos materiais	R\$ 2.603.998,90
2.1.6.3	Instalações provisórias	R\$ 208.319,91
2.1.7	Fretes, seguros e taxas	R\$ 520.799,78
2.1.8	Peças sobressalentes	R\$ 416.639,82
2.1.9	Inventários iniciais	R\$ 0,00
2.1.10	Veículos, móveis, utensílios	R\$ 0,00
<b>2.2</b>	<b>Investimento OSBL</b>	<b>R\$ 20.998.647,13</b>
2.2.1	Unidade de captação de adução de água variável	R\$ 2.624.830,89
2.2.2	Unidade de tratamento de água variável	R\$ 2.624.830,89
2.2.3	Torres de resfriamento variável	R\$ 2.624.830,89
2.2.4	Sistema de geração de vapor variável	R\$ 2.624.830,89
2.2.5	Compressão e distribuição de ar industrial e vapor	R\$ 2.624.830,89
2.2.6	Unidade de gás inerte variável	R\$ 2.624.830,89
2.2.7	Sistema de distribuição de água	R\$ 2.624.830,89
2.2.8	Infraestrutura e utilidades	R\$ 2.624.830,89
2.2.9	Parque de tancagem variável	R\$ 0,00
2.2.10	Unidade de tratamento de efluentes	R\$ 0,00
2.2.11	Subestação elétrica	R\$ 0,00
2.2.12	Distribuição elétrica	R\$ 0,00
2.2.13	Sistema de combate a incêndio	R\$ 0,00
2.2.14	Edifícios de administração	R\$ 0,00
<b>3.0</b>	<b>Investimento Fixo</b>	<b>R\$ 61.877.763,44</b>
<b>4.0</b>	<b>Despesas financeiras durante a construção</b>	<b>R\$ 6.187.776,34</b>
<b>5.0</b>	<b>Capital de giro</b>	<b>R\$ 9.281.664,52</b>
<b>6.0</b>	<b>INVESTIMENTO TOTAL (R\$)</b>	<b>R\$ 77.347.204,30</b>

## Anexo 4 - Tabela de Equipamentos Principais

Equipamentos	US\$ FOB (2025)	Internalização	US\$ FOB (2025)	US\$ FOB (2025)	R\$ FOB (2025)
Secador por atomização (SD-01)	\$126.300,00	\$0,00	\$126.300,00	\$505.200,00	680.630,70
Trocador de calor (TC-01) (2x225m <sup>2</sup> )	\$189.400,00	\$0,00	\$189.400,00	\$378.800,00	1.020.676,60
Ciclone de separação (CI-01) (4x)	\$320.000,00	\$0,00	\$320.000,00	\$640.000,00	1.724.480,00
Tanque de mistura (TQ-01)	\$32.046,76	\$0,00	\$32.046,76	\$52.877,16	172.700,00
Tanque de Preparo de Emulsão (TQ-02)	\$10.762,66	\$0,00	\$10.762,66	\$17.758,40	58.000,00
Tanque de Estocagem (TQ-03)	\$2.041,20	\$0,00	\$2.041,20	\$3.367,97	11.000,00
Silo (TQ-04)	\$13.546,11	\$0,00	\$13.546,11	\$22.351,09	73.000,00
Bomba (B-01)	\$3.344,00	\$0,00	\$3.344,00	\$5.517,60	18.020,82
Bomba (B-02)	\$5.014,00	\$0,00	\$5.014,00	\$8.273,10	27.020,45
Bomba (B-03)	\$3.900,00	\$0,00	\$3.900,00	\$6.435,00	21.017,10
Filtro (FILT-01)	\$35.300,00	\$0,00	\$35.300,00	\$58.245,00	190.231,70
Compressor de ar (C-01) (3 x 100 HP)	\$117.000,00	\$0,00	\$117.000,00	\$234.000,00	630.513,00
		TOTAL (R\$)	\$858.654,73	\$1.932.825,31	10.415.995,60


## Anexo 5 - Tabela de Custo Variável

Capacidade de produção (t/ano)	7200	Unidade	Consumo/Geração		Preço	Custo
			Un./t de produto	Un./ano	R\$/unidade	R\$/ano
Matéria-prima	Óleo essencial de laranja	kg	216	1555200	85,00	132.192.000,00
	Capsul	kg	862,22	6207984	120,00	744.958.080,00
	Água de Processo	kg	4.311,12	31040064	0,02	682.881,41
Utilidades industriais	Energia elétrica	kWh	150,00	1080000	0,75	810.000,00
	Água de processo	m <sup>3</sup>	2,5	18000	3,00	54.000,00
	Ar comprimido	Nm <sup>3</sup>	20	144000	0,06	8.640,00
	Vapor	ton	0,5	3600	120,00	432.000,00
Tratamento de rejeitos	Efluentes	kg de efluentes / ton de produto	4	28800	25	720.000,00
	Resíduos Sólidos	ton	0,05	360	180	64.800,00
<b>TOTAL (R\$)</b>						<b>879.922.401,41</b>

## Anexo 6 – Tabela de Custos Fixos

CUSTOS FIXOS			R\$/ano	
1	Mão de obra de operação		960.000,00	1.440.000,00
2	Mão de obra de manutenção	3% do investimento fixo/ano	1.856.332,90	2.784.499,35
3	Materiais de manutenção	3% do investimento fixo/ano	144.000,00	216.000,00
4	Seguros e taxas	0,5% do investimento fixo/ano	1.856.332,90	2.784.499,35
5	Despesas gerais e adm da planta	80% de mão de obra op.+man.	2.253.066,32	3.379.599,48
<b>TOTAL</b>			<b>7.069.732,13</b>	<b>10.604.598,19</b>

## Anexo 7 - Fluxo de Caixa

 <b>Fluxo de caixa (R\$/ano)</b>						
	Projeto	Preço de venda (por kg)	R\$ 130,00	Operação		
		Produção (kg)	7200000	1	2	30
Receitas	R\$ 936.000.000,00			936000000,00	936000000,00	936.000.000,00
Custo Variável	R\$ 879.922.401,41			879922401,41	879922401,41	879.922.401,41
Custo fixo + Depreciação	R\$ 19.960.231,89			19960231,89	19960231,89	19.960.231,89
Lucro Bruto	R\$ 36.117.366,70			36117366,70	36117366,70	36.117.366,70
Impostos (40%)	R\$ 14.446.946,68			12279904,68	12279904,68	12.279.904,68
Lucro Líquido	R\$ 21.670.420,02			23837462,02	23837462,02	23.837.462,02
Depreciação	R\$ 3.056.090,61			3056090,61	3056090,61	3.056.090,61
Geração de caixa	R\$ 24.726.510,63			26893552,63	26893552,63	26.893.552,63
Valor residual	R\$ 7.734.720,43			0,00	0,00	7.734.720,43
Investimento	R\$ 77.347.204,30			0,00	0,00	-
Fluxo de caixa	<b>-R\$ 44.885.973,24</b>		<b>-R\$ 77.347.204,30</b>	26893552,63	26893552,63	34.628.273,06
VPL (R\$)	R\$ 354.225.234,70	TMA		<b>VIABILIDADE:</b>	<b>VIÁVEL</b>	
TIR	<b>35%</b>	15%	% a.a.	Ok		
VPL/INV	R\$ 4,58	2		Ok		